

分类号：TS236.9

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220530103

芡实淀粉改性及低 GI 芡实食品的研制

MODIFICATION OF EURYALE FEROX STARCH
AND PREPARATION OF LOW GI EURYALE FEROX
FOOD

学生姓名：张青强

指导老师：李春阳（研究员）

专 业：食品科学与工程

研究方向：农产品加工及贮藏技术

论文答辩日期：2025 年 05 月 15 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：张青强

日期：2025年05月18日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部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：张青强

日期：2025 年 05 月 18 日

指导教师签名：李书明

日期：2025 年 05 月 18 日

芡实淀粉改性及低 GI 芡实食品的研制

摘 要

芡实 (*Euryale ferox* Salisb), 草本水生植物, 广泛分布于亚洲的温带和亚热带地区。芡实属药食同源, 富含淀粉、氨基酸以及丰富的维生素和矿物质, 具有益肾固精、补脾止泻、祛湿止带的功效。糖尿病问题一直是热点问题, 利用天然抗糖物质作为原料改善糖尿病是值得研究的项目。因此本文对芡实成分进行研究, 为芡实调节糖尿病找出科学依据, 并对芡实淀粉进行改性分析, 最后对以芡实为原料的食品配方进行复配, 并分析食品的风味以及功能性。主要研究结果如下:

(1) 通过代谢组学、网络药理学及分子对接技术分析不同芡实品种中的活性成分及其对糖尿病的作用。使用四极杆飞行时间液质联用系统对芡实成分进行检测和分析; 通过 PubChem 网站筛选出芡实中具有生物活性的成分; 使用 Swiss 靶点数据库预测芡实成分靶点, 通过多种数据库检索疾病靶点取并集; 绘制 PPI 网络查找主要成分及核心靶点; 对交集靶点进行 GO 富集分析和 KEGG 富集分析; 最后通过分子对接技术进行验证。苏芡和刺芡中有 153 种在含量方面具有显著差异的成分; 在苏芡中筛选出 12 种具有缓解糖尿病及其并发症的成分以及 578 个潜在靶点, 刺芡中筛选出 3 种具有缓解糖尿病及其并发症的成分及 226 个潜在靶点; GO 富集和 KEGG 富集分析以及分子

对接分析验证，苏芡成分在缓解糖尿病及其并发症等方面具有更好的效果。为芡实调节糖尿病提供理论支持。

(2) 探究微波压热和超声酶解以及增强处理方法对芡实淀粉结构、理化特征及体外消化特性的影响，通过微波压热、超声酶解、微波压热-超声酶解增强改性处理研究对芡实淀粉的表面结构、结晶结构、短程有序结构、硬度、胶粘性、咀嚼性、弹性、溶解度、膨胀度、析水性、持水性、直链淀粉含量、消化特性的影响。结果表明：单一和增强改性处理的淀粉中，快消化淀粉含量较原淀粉降低，直链淀粉和抗性淀粉含量增加，改性淀粉样品的颗粒形貌发生明显变化，吸光度有显著差异，咀嚼性、弹性、膨胀度降低，溶解度普遍升高。微波压热增加超声酶解处理后的芡实淀粉中抗性淀粉含量最高，比原淀粉高 24.45%。此研究为改性芡实淀粉的理化特性变化和体外消化特性变化，以及深加工应用提供了理论支持。

(3) 芡实低 GI 食品的开发：为了复配芡实类食品，通过单因素分析、正交分析、响应面分析优化配方。芡实麦棒复配工艺分别研究以芡实粉添加量、全麦粉添加量、低筋粉添加量、燕麦预拌粉添加量对芡实麦棒品质的影响，最终通过正交实验确定最佳配比。芡实代餐粉以芡实粉添加量、白芸豆添加量、藜麦添加量、魔芋添加量为变量因素，以水解率为指标，通过响应面分析确定最佳配比，确定麦棒配方为芡实粉添加量为 20 g，全麦粉添加量为 55 g，低筋粉添加量为 60

g, 燕麦预拌粉添加量为 15 g。确定代餐粉配方为芡实粉添加量为 31 g, 藜麦粉添加量为 30 g, 白芸豆粉添加量为 25 g, 魔芋粉添加量为 5 g。

(4) 芡实低 GI 食品的品质评价: 对芡实麦棒和芡实代餐粉进行升糖指数的测定, 应用电子鼻和电子舌进行风味和滋味检测以及抗氧化分析。结果显示麦棒和代餐粉的升糖指数分别为 42.42 和 33.55, 属低升糖指数食品。电子鼻和电子舌分析代餐粉相较于各原料滋味均衡。芡实代餐粉比市售营养粉超氧阴离子清除率高 153.22%, 芡实麦棒比市售营养粉超氧阴离子清除率高 25.75%。芡实代餐粉的总抗氧化能力是市售营养粉的 2.22 倍。

关键词: 芡实, 淀粉改性, 降血糖, 抗氧化, 代谢组学

MODIFICATION OF EURYALE FEROX STARCH AND PREPARATION OF LOW GI EURYALE FEROX FOOD

ABSTRACT

Euryale ferox Salisb, a herbaceous aquatic plant, is widely distributed in temperate and subtropical regions of Asia. *Euryale ferox* is both a food and a medicine, rich in starch, amino acids, vitamins, and minerals. It possesses the functions of benefiting the kidney and strengthening essence, tonifying the spleen and stopping diarrhea, and dispelling dampness and stopping leucorrhea. The problem of diabetes has always been a hot topic, and utilizing natural anti-diabetic substances as raw materials to improve diabetes is a project worth studying. Therefore, this paper investigates the components of *Euryale ferox* to find scientific evidence for its role in regulating diabetes, analyzes the modification of *Euryale ferox* starch, and finally formulates food recipes using *Euryale ferox* as the main ingredient, analyzing the flavor and functionality of the food. The main research results are as follows:

(1) Analysis of active components in different *Euryale ferox* varieties and their effects on diabetes through metabolomics, network pharmacology, and molecular docking. The components of *Euryale ferox* were detected and analyzed using a quadrupole time-of-flight liquid chromatography-mass spectrometry system. Bioactive components in *Euryale ferox* were screened through the PubChem website. Targets of *Euryale ferox* components were predicted using the SwissTargetPrediction database, and disease targets were retrieved from multiple databases and combined. A PPI network was constructed to identify key components and core targets. GO enrichment analysis and KEGG enrichment analysis were performed on the intersection targets. Finally, molecular docking technology was used for verification. 153 components showed significant differences in content

between *South Euryale* and *North Euryale* varieties. 12 components with the potential to alleviate diabetes and its complications and 578 potential targets were identified in *South Euryale*, while 3 components with the potential to alleviate diabetes and its complications and 226 potential targets were identified in *North Euryale*. GO enrichment, KEGG enrichment, and molecular docking analysis confirmed that *South Euryale* components have better effects in alleviating diabetes and its complications. This provides a theoretical basis for *Euryale ferox* to regulate diabetes.

(2) Investigation of the effects of microwave hydrothermal treatment, ultrasonic enzymatic hydrolysis, and combined enhancement treatment on the structure, physicochemical characteristics, and in vitro digestion properties of *Euryale ferox* starch. The effects of microwave hydrothermal treatment, ultrasonic enzymatic hydrolysis, and microwave hydrothermal-ultrasonic enzymatic hydrolysis enhanced modification treatment on the surface structure, crystal structure, short-range ordered structure, hardness, adhesiveness, chewiness, elasticity, solubility, swelling power, syneresis, water holding capacity, amylose content, and digestion characteristics of *Euryale ferox* starch were studied. The results showed that the rapidly digestible starch content in starches treated with single and combined modification methods was lower than that of native starch, while the amylose and resistant starch content increased. The particle morphology of the modified starch samples changed significantly, the absorbance showed significant differences, chewiness, elasticity, and swelling power decreased, and solubility generally increased. The resistant starch content in *Euryale ferox* starch treated with microwave hydrothermal combined with ultrasonic enzymatic hydrolysis was the highest, 24.45% higher than that of native starch. This study provides a theoretical basis for the changes in physicochemical properties and in vitro digestion characteristics of modified *Euryale ferox* starch, as well as its deep processing applications.

(3) Development of *Euryale ferox* Low GI Foods: To formulate *Euryale ferox*-based foods, single-factor analysis, orthogonal analysis, and response surface methodology were used to optimize the recipes. For *Euryale ferox* wheat sticks, the effects of *Euryale ferox* powder addition,

whole wheat flour addition, low-gluten flour addition, and oat premix powder addition on the quality of *Euryale ferox* wheat sticks were studied, and the optimal ratio was determined through orthogonal experiments. For *Euryale ferox* meal replacement powder, the addition amounts of *Euryale ferox* powder, white kidney bean, quinoa, and konjac were used as variable factors, and the hydrolysis rate was used as an indicator. The optimal ratio was determined through response surface methodology. The determined wheat stick recipe was: *Euryale ferox* powder addition of 20 g, whole wheat flour addition of 55 g, low-gluten flour addition of 60 g, and oat premix powder addition of 15 g. The determined meal replacement powder recipe was: *Euryale ferox* powder addition of 31 g, quinoa powder addition of 30 g, white kidney bean powder addition of 25 g, and konjac powder addition of 5 g.

(4) Quality Evaluation of *Euryale ferox* Low GI Foods: The glycemic index of *Euryale ferox* wheat sticks and *Euryale ferox* meal replacement powder was determined, and electronic nose and electronic tongue were used to analyze flavor and taste, along with antioxidant analysis. The results showed that the glycemic indices of the wheat sticks and meal replacement powder were 42.42 and 33.55, respectively, classifying them as low glycemic index foods. Electronic nose and electronic tongue analysis showed that the meal replacement powder had a balanced taste compared to its individual ingredients. Total phenol content measurement showed that the wheat sticks and meal replacement powder had higher content than commercially available nutritional powders and exhibited high antioxidant activity. The superoxide anion scavenging rate of the *Euryale ferox* meal replacement powder was 153.22% higher than that of commercially available nutritional powder, and the superoxide anion scavenging rate of the *Euryale ferox* wheat sticks was 25.75% higher than that of commercially available nutritional powder. The total antioxidant capacity of the *Euryale ferox* meal replacement powder was 2.22 times that of commercially available nutritional powder.

KEY WORDS: *Euryale ferox*, Starch modification, Hypoglycemic, Antioxidant, Metabolomics

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 芡实简介.....	1
1.2 芡实的研究进展.....	1
1.2.1 芡实的功能性研究进展.....	1
1.2.2 芡实类食品研究进展.....	2
1.3 淀粉改性的研究进展.....	2
1.3.1 淀粉改性的概念.....	2
1.3.2 抗性淀粉的概念.....	3
1.3.3 淀粉改性的应用.....	3
1.4 营养代餐粉及麦棒的研究进展.....	4
1.4.1 营养代餐粉的概述.....	4
1.4.2 营养代餐粉的研究进展.....	4
1.4.3 代餐粉原料的选择.....	4
1.4.4 营养代餐粉的前景.....	5
1.4.5 麦棒的研究进展.....	5
1.5 代谢组学与网络药理学.....	6
1.5.1 组学概述.....	6
1.5.2 代谢组学概述.....	6
1.5.3 代谢组学的应用.....	6
1.5.4 网络药理学概述.....	7
1.5.5 网络药理学的应用.....	7
1.6 研究内容及目的意义.....	8
1.6.1 研究内容.....	8
1.6.2 研究目的及意义.....	8
第 2 章 代谢组学及网络药理学分析芡实中活性成分及其对糖尿病的作用.....	10
2.1 前言.....	10
2.2 材料与仪器.....	10
2.2.1 材料与试剂.....	10
2.2.2 仪器与设备.....	11
2.3 试验方法.....	11

2.3.1 LC-QTOF-MS 分析茭实提取液.....	11
2.3.2 茭实成分靶点及糖尿病作用靶点的筛选.....	11
2.3.3 构建蛋白质互作 (PPI) 网络.....	12
2.3.4 GO 富集分析及 KEGG 富集分析.....	12
2.3.5 分子对接验证.....	12
2.4 结果与分析.....	12
2.4.1 代谢组学分析.....	12
2.4.2 茭实成分靶点及糖尿病作用靶点的筛选结果分析.....	15
2.4.3 构建 PPI 网络结果分析.....	17
2.4.4 GO、KEGG 富集结果分析.....	18
2.4.5 分子对接分析.....	21
2.5 讨论.....	21
2.6 本章小结.....	24
第 3 章 微波压热与超声酶解的茭实淀粉结构特征与理化特性变化.....	25
3.1 前言.....	25
3.2 材料与仪器.....	25
3.2.1 材料与试剂.....	25
3.2.2 仪器与设备.....	26
3.3 实验方法.....	26
3.3.1 改性淀粉的制备.....	26
3.3.2 表面颗粒形态分析.....	27
3.3.3 红外光谱分析.....	27
3.3.4 X-射线衍射分析	27
3.3.5 直链淀粉的测定.....	27
3.3.6 凝胶质构特性分析.....	27
3.3.7 溶解度与膨胀度的测定.....	28
3.3.8 析水率的测定.....	28
3.3.9 持水率的测定.....	28
3.3.10 快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉的测定.....	29
3.3.11 数据处理与分析.....	29
3.4 结果与分析.....	29
3.4.1 改性处理对茭实淀粉微观结构的影响.....	29
3.4.2 改性处理对茭实淀粉红外光谱的影响.....	30

3.4.3 改性处理对芡实淀粉 X-射线衍射图谱的影响	32
3.4.4 改性处理对芡实淀粉中直链淀粉含量的影响.....	33
3.4.5 改性处理对芡实淀粉质构特性的影响.....	33
3.4.6 改性处理对芡实淀粉溶解度、膨胀度的影响.....	34
3.4.7 改性处理对芡实淀粉析水性、持水性的影响.....	35
3.4.8 改性处理对芡实淀粉消化性的影响.....	36
3.4.9 芡实原淀粉与改性淀粉的理化特性的聚类热图分析.....	37
3.5 本章小结.....	38
第 4 章 低 GI 芡实麦棒复配及营养代餐粉的复配工艺研究	39
4.1 前言.....	39
4.2 材料与仪器.....	39
4.2.1 材料与试剂.....	39
4.2.2 仪器与设备.....	40
4.3 实验方法.....	40
4.3.1 芡实麦棒制备工艺.....	40
4.3.2 芡实麦棒基础配方.....	40
4.3.3 芡实麦棒配方优化.....	40
4.3.4 感官评价标准.....	41
4.3.5 芡实代餐粉制备工艺.....	41
4.3.6 芡实代餐粉单因素实验.....	42
4.3.7 代餐粉水解率测定.....	42
4.4 结果与分析.....	42
4.4.1 芡实粉添加量对芡实麦棒品质的影响.....	42
4.4.2 全麦粉添加量对芡实麦棒品质的影响.....	43
4.4.3 低筋粉添加量对芡实麦棒品质的影响.....	43
4.4.4 燕麦预拌粉添加量对芡实麦棒品质的影响.....	44
4.4.5 正交实验优化芡实麦棒品质.....	45
4.4.6 芡实粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响.....	46
4.4.7 白芸豆粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响.....	47
4.4.8 藜麦粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响.....	47
4.4.9 魔芋粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响.....	48
4.4.10 响应面优化分析.....	48
4.5 本章小结.....	50

第 5 章 芡实麦棒和代餐粉理化特性及体外消化分析.....	52
5.1 前言.....	52
5.2 材料与仪器.....	52
5.2.1 材料与试剂.....	52
5.2.2 仪器与设备.....	53
5.3 实验方法.....	53
5.3.1 体外淀粉消化测试.....	53
5.3.2 电子舌测试.....	53
5.3.3 电子鼻测试.....	53
5.3.4 麦棒质构测试.....	54
5.3.5 麦棒货架期测试.....	54
5.3.6 总酚含量测试.....	54
5.3.7 抗氧化测试.....	55
5.4 结果与分析.....	55
5.4.1 体外淀粉消化结果分析.....	55
5.4.2 电子舌结果分析.....	56
5.4.3 电子鼻结果分析.....	58
5.4.4 麦棒质构结果分析.....	60
5.4.5 麦棒货架期结果分析.....	60
5.4.6 总酚结果分析.....	60
5.4.7 抗氧化结果分析.....	61
5.5 本章小结.....	62
第 6 章 结论与展望.....	63
6.1 结论.....	63
6.2 创新点.....	64
6.3 展望.....	64
参考文献:	65
攻读学位期间发表的学术论文.....	79
致谢.....	80

第 1 章 绪论

1.1 芡实简介

芡实 (*Euryale ferox* Salisb), 又名鸡头米、鸡嘴莲、鸡米等, 是大型一年生草本水生植物, 属于睡莲科^[1]。广泛分布于亚洲的温带和亚热带地区, 主要种植于中国、印度、孟加拉国、韩国、日本等亚洲国家, 在我国分布于江苏、安徽、广东、湖南、山东和江西省^[2], 常见于淡水湖泊、池塘等静水环境。芡实属药食同源, 富含淀粉 (淀粉占比超过 70%^[3]), 此外还包含 7 种氨基酸以及丰富的维生素和矿物质, 其味甘、涩、平, 且具有益肾固精、补脾止泻祛湿止带的功效^[4]。

随着人们对健康饮食和天然药物的关注, 芡实的营养价值和药用价值受到越来越多的重视, 相关研究主要集中在化学成分分析、药理作用机制、栽培技术优化以及产品开发等方面。芡实不仅是一种重要的经济作物, 也是连接传统医学与现代科学研究的桥梁, 具有广阔的应用前景和研究意义。

1.2 芡实的研究进展

芡实属药食同源类, 作为中国传统中药的成分, 芡实既能益肾, 又能健脾, 还能抗氧化。作为食品, 芡实可以煮粥、炖汤、做糕点等, 煮熟的芡实软糯有弹性, 烹饪风味咸甜皆宜。

1.2.1 芡实的功能性研究进展

芡实对肠易激综合征(IBS)的治疗有一定的效果, 林漪清^[5]等对医院治疗腹泻型肠易激综合征的中药处方进行分析发现, 在相关的 259 种中药饮片中, 使用频次最多的 10 种中药是芡实、砂仁、党参、淫羊藿、肉豆蔻、麸炒苍术、陈皮、麸炒白术、炮姜、防风, 芡实的使用频次最高。而在这些处方中, 病症类型最多的是脾肾阳虚证, 占比 93.23%。因为在中医理论中芡实具有涩肠止泻、温脾补肾^[6]、除湿止带、益肾固精的功效, 所以芡实通过温脾补肾来治疗脾肾阳虚类肠易激综合征。

芡实有改善糖尿病的作用, 蔡嘉洛^[7]等通过调配中药黄精芡实汤, 并分为低、中、高剂量为雄性大鼠给药。发现高中低剂量给药的大鼠血糖水平显著降低 ($P<0.05$), 体重稍下降但无显著性差异 ($P>0.05$)。最终研究发现黄精芡实汤调节血

糖的机制与上调大鼠骨骼肌磷脂酰肌醇 3 激酶 (PI3K)、蛋白激酶 B (Akt)、葡萄糖运载体 (GLUT4) 蛋白表达水平相关, 激活了胰岛素受体后 PI3K/Akt/GLUT4 信号通路, 调节脂肪、葡萄糖等代谢。

此外芡实中包含有黄酮类化合物和多酚类化合物, 如槲皮素、表儿茶素、没食子酸、异槲皮苷和柚皮素等^[8]。这些成分不但使芡实具有降血糖的作用, 还有抗炎抗消化的作用。这些酚类化合物是植物中常见的次级代谢产物, 含有大量羟基, 可以通过贡献电子或氢原子来中和体内过量的自由基, 而产生抗氧化的作用。植物多酚还可以与淀粉相互作用, 这种相互作用可能改变淀粉的理化性质或与淀粉分子竞争消化酶的活性位点, 从而降低淀粉水解效率, 抑制其消化^[9], 从而不易引起血糖含量的快速变化。

1.2.2 芡实类食品研究进展

芡实因为具有丰富的淀粉含量, 常被以粉状形态加入到食品中进行深加工。如研究者刘冠君^[10]等, 以芡实粉、红枣粉、木糖醇等为原料, 通过双螺杆挤压后粉碎制成冲调粉。且冲调粉的组织状况、稳定性都很好, 有芡实、红枣的香味, 口感细腻光滑, 不会结块。芡实除了作为冲调粉外, 当然也可以做成馒头, 谢彦瑰^[11]等人利用芡实富含淀粉的特性, 以芡实粉、鹰嘴豆粉、高筋小麦粉等为原料, 通过酵母发酵制成馒头。馒头有轻微的芡实味道, 按压复原性较好, 口感细腻、不黏牙, 无掉渣、回味甘甜。既然有馒头, 当然也有芡实糕点, 田晓玲^[12]等以蓝莓渣、糯米粉和芡实粉等为原料制作芡实糕点。最终产品有芡实和蓝莓渣的特有香味, 甜味适宜, 蓬松有弹性。其它的芡实类食品还包括王腾宇^[13]等的茯苓多糖芡实米饼。

通过目前的研究进展可以知道, 芡实类食品的开发主要还是利用芡实的淀粉含量高的特性, 与其它原料进行复配, 从而做出美味的食品。因此芡实淀粉在食品领域是研究的重点。

1.3 淀粉改性的研究进展

1.3.1 淀粉改性的概念

淀粉改性是指通过物理、化学或生物手段改变天然淀粉的结构和性质, 以提升其功能特性, 满足不同应用需求的过程。如提高溶解性、稳定性、粘度等, 使其适用于食品、医药、纺织、造纸、生物降解材料等领域。

1.3.2 抗性淀粉的概念

抗性淀粉（Resistant Starch）是一种在小肠中难以被消化酶分解的淀粉，能够完整进入大肠，被肠道微生物发酵利用。主要包括物理包埋型（RS1）：存在于未加工或部分加工的谷物、种子中，因细胞壁保护而难以消化。抗性颗粒（RS2）：存在于生土豆、青香蕉等食物中，天然状态下抗消化。回生淀粉（RS3）：由烹饪后冷却的淀粉类食物形成，如冷米饭、冷土豆。化学改性淀粉（RS4）：通过化学修饰增强抗消化性，常见于加工食品。

1.3.3 淀粉改性的应用

淀粉改性大致可以分为三大类，第一是物理改性，包括热处理：通过加热改变淀粉的糊化特性；机械处理：球磨、挤压等，改变淀粉颗粒结构；辐射处理：利用 γ 射线或电子束改变淀粉分子结构。第二是化学改性，有酯化：引入酯基，改善溶解性和稳定性；醚化：引入醚基，增强抗老化性和冻融稳定性；交联：通过交联剂增强淀粉的耐热性和机械强度；氧化：使用氧化剂提高糊化温度和粘度。第三是生物改性，有酶处理：利用酶改变淀粉分子结构，提升特定功能；发酵：通过微生物发酵改变淀粉性质。其它还有超声波处理、微波处理等。

根据近些年文献来看，具体改性方法中热处理、机械处理、酶处理、超声处理、微波处理、酯化等用到的最多。首先热处理会使淀粉发生糊化，淀粉糊化是当淀粉在 53 °C 以上的热液中时发生溶胀、崩解从而形成粘稠糊状溶液。有 Du^[14]等研究者分别把荞麦淀粉放入 25 °C、65 °C、95 °C 的水溶液中，随着温度的增加，淀粉糊化程度增大，长程有序结构完全破坏，且消化速率更快。压力处理也是淀粉改性的常用方法，Rivero-Ramos^[15]等研究人员通过高静水压处理大米淀粉-没食子酸复合物，发现消化率降低，可归因于直链淀粉和没食子酸之间的分子相互作用增加，复合分子难以被破坏分解。酶法淀粉改性常用到 α -淀粉酶、葡糖苷酶、普鲁兰酶等，Shuprajhaa^[16]等通过使用 α -淀粉酶、普鲁兰酶分别处理香蕉淀粉，发现 α -淀粉酶处理后的香蕉淀粉中直链淀粉、抗性淀粉含量降低，快消化淀粉含量增加；普鲁兰酶处理后的香蕉淀粉，直链淀粉和抗性淀粉含量升高，快消化淀粉含量降低。另外加入超声波辅助酶解，因为超声波处理是一种能够诱导淀粉物理解聚的方法。超声波处理的影响来自于声空化，其中气泡在短时间内受到热量和压力作用时，在液体中形成并迅速破裂。此外，超声波可以破坏淀粉的颗粒结构，促进酶更深的渗透和更均匀的改性，从而通过增强功能特性来优化产品质量。微波改性利用微波辐射穿透淀粉基质，产生振动并通过摩擦产生热量。研究表明，微波处理可以降低淀粉的短程有序性和峰值粘度，增加抗性淀粉的含

量^[17]。淀粉酯化改性是利用柠檬酸和苹果酸等有机酸,由于它们能够通过羧基和羟基之间的反应与淀粉轻松形成酯键而被选为交联剂^[18],从而提高抗性淀粉的含量。

1.4 营养代餐粉及麦棒的研究进展

1.4.1 营养代餐粉的概述

代餐粉可由谷类、薯类、坚果类、蔬菜类、水果类等作为原料,通过合理的配比制成粉末状冲调性食品。代餐粉具有营养均衡、能量可控、增强饱腹感、便捷食用的特点,按功能特点可分为基础营养型、体重管理型、运动能量型、特俗人群型等,最终达到控制能量摄入、提供基本营养或特定健康目的

1.4.2 营养代餐粉的研究进展

如表 1-1 汇总了近些年的代餐粉研究进展,代餐粉研究近年来在原料多样化和功能性强化方面取得了显著进展,广泛采用植物性原料(如杂粮、坚果、藻类等)和功能性成分(如膳食纤维、低热量甜味剂、蛋白质等),注重低 GI、高蛋白、高纤维等健康特性,适合糖尿病、肥胖及健身人群。研发方向聚焦天然、营养和创新搭配,强调营养均衡和功能性,未来有望进一步优化配方,提升口感和营养价值,并探索更多功能性成分的应用。

1.4.3 代餐粉原料的选择

根据其他研究者的原料选择以及本身代餐粉功能的需要,选择白芸豆、藜麦、魔芋作为代餐粉原料。魔芋块茎中仅次于水分的主要成分为葡甘聚糖,约占 64.78%,其次是蛋白质(2.56%)、还原性糖(1.61%)、淀粉(1.46%)、纤维素(1.43%)。葡甘聚糖是一种天然的亲水性植物多糖,具有流变性、持水性、凝胶形成特性,在食品工业中应用广泛。除此之外,魔芋中也能分离提取得到很多的小分子活性物质,如生物碱、核黄素、 β -谷甾醇、甲基吡咯烷小分子糖、胡萝卜素和维生素等^[19]。白芸豆是一种营养丰富的豆类,含有 17.51%~32.63%的蛋白质、11.97%~47.92%的淀粉,以及脂质、膳食纤维和植物化学物等成分。其富含的 α -淀粉酶抑制剂能有效抑制淀粉消化,适合作为 2 型糖尿病患者的膳食来源。白芸豆淀粉具有高抗消化性能,可用于开发低血糖生成指数食品,具有广阔的功能性食品应用潜力^[20]。藜麦是一种营养丰富的传统粮食作物,富含蛋白质、膳食纤维和多种营养物质,具有较高的营养价值和健康功效。其发芽过程中,蛋白质、膳食纤维和抗氧化物质含量增加,赋予其抗氧化、抗炎和抗肿瘤等功能,适合开发

功能性食品。此外，藜麦面团的流变性研究有助于改进加工工艺，提升产品质量和口感。藜麦在健康饮食和功能性食品开发中具有重要潜力^[21]。

表 1-1 近年代餐粉研究进展

Table 1-1 Research progress of meal powder in recent years

名称	主要原料	主要研发人员
膨化核桃代餐粉	膨化核桃粕粉、速溶椰子粉、利体素	朱婉榕 ^[22]
枸杞杂粮代餐粉	黄豆、绿豆、黑豆、燕麦、苦荞和藜麦、枸杞	马娇 ^[23]
螺旋藻复配代餐粉	螺旋藻粉、燕麦粉、赤小豆粉、魔芋粉、奇亚籽、木糖醇、脱脂奶粉	米顺利 ^[24]
黄精杂粮代餐粉	黄精、大豆、麦仁、燕麦、三色藜麦、籽粒苋	王俊楠 ^[25]
板栗柚子皮代餐粉	柚子皮粉、玉米粉、麦芽糊精	付文军 ^[26]
石斛马铃薯代餐粉	石斛粉、木糖醇、奶粉、马铃薯粉、魔芋粉	谢艳东 ^[27]
紫薯代餐粉	紫薯、榛子、乳清分离蛋白、魔芋精粉、木糖醇	艾薇 ^[28]
抹茶代餐粉	黑米粉、黑豆粉、黑芝麻粉、熟糯米粉、燕麦粉、葛根粉、魔芋粉、全脂乳粉、乳清蛋白粉、菊粉、抹茶	朱尧 ^[29]

1.4.4 营养代餐粉的前景

随着消费者越来越关注健康饮食及体重管理，对低热量和高营养的食品需求增加，需要寻找方便的膳食食品。另一方面肥胖人口增加使人们更迫切的追求健康食品。代餐粉作为以健康、方便、快捷为特点的食品，结合食品科技的发展进步使得代餐粉的营养成分和口味不断优化。在未来可以在代餐粉中加入天然有机成分进行功能性增强，未来个性化定制会成为代餐粉健康发展的方向。

1.4.5 麦棒的研究进展

麦棒通常指一种以燕麦为主要成分的零食棒，也称为燕麦棒或能量棒。它由燕麦、坚果、蜂蜜、干果^[30]等原料混合制成，经过烘烤或压制而成。麦棒富含纤维、蛋白质和健康脂肪，常作为健康零食或运动后的能量补充品。

麦棒按照功能分类可分为休闲类、运动类和减肥类^[31]，休闲类具有口感好的特点，常作为日常小零食食用；运动类的特点是高蛋白、高脂肪、高碳水化合物，用来在高强度体力运动时食用；减肥类具有保健功能，适合高血压、冠心病、糖尿病类人群食用，特点是蛋白质、膳食纤维、维生素和矿物质的均衡搭配，不易引起血糖突然升高。

1.5 代谢组学与网络药理学

1.5.1 组学概述

组学（Omics）是指对生物体内各类分子进行全面研究的学科领域，通常通过大规模分析技术来探索生物系统的分子组成和功能^[32]。常见的组学有四类，分别为基因组学（Genomics）：研究生物体的全部基因及其功能^[33]；转录组学（Transcriptomics）：分析基因转录产生的所有 RNA 分子^[34]；蛋白质组学（Proteomics）：研究细胞或组织中所有蛋白质的表达、结构和功能^[35]；代谢组学（Metabolomics）：分析生物体内所有代谢产物的组成和变化^[36]。另外还有表观基因组学（Epigenomics）、脂质组学（Lipidomics）、糖组学（Glycomics）等。

1.5.2 代谢组学概述

代谢组学是以质谱（MS）、液相/气相色谱（LC/GC）、核磁共振（NMR）为技术手段，对生物样本的代谢物进行鉴定、对代谢途径进行分析、对生物标志物进行发现等，通过数据预处理（包括峰提取、对齐和归一化）、统计分析（包括主成分分析（PCA）和偏最小二乘法（PLS）等）以及代谢途径分析等，研究生物体内所有代谢产物的组成、变化及其与生物过程关系。代谢组学已应用在了医学上的疾病诊断、药物研发；农业上的作物改良、抗病研究；环境科学的生态监测、微生物代谢等领域。

1.5.3 代谢组学的应用

代谢组学作为一种研究方法，可单独对动植物代谢物进行研究，比如 Ji^[37]等研究者运用代谢组学分析揭示四种当归属植物挥发性代谢物的差异。Yu^[38]等研究者运用代谢组学检测小鼠血清中成分的差异，分析黄柏知母药对小鼠的糖尿病的干预效果。

尽管单一代谢组学已经可以很好的揭示代谢物的差异，但其分析较为片面，分析深度也欠佳。因此很多研究者选择多组学分析，即把代谢组学与其它组学相结合进行分析。比如 Chen^[39]等研究者阐述了多组学方法（包括基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学）从基因、RNA、蛋白质和代谢物的角度有效地解释心绞痛的系统信息。还有一些中国研究者常把代谢组学与网络药理学结合运用，从而分析某种中药成分对疾病的作用效果。通过代谢组学筛选出差异物质，然后用网络药理学技术探究这些主要活性物质的潜在抗炎机制。代谢组学结合其它分析方法使研究更加深入。

1.5.4 网络药理学概述

网络药理学^[40]是一门整合系统生物学、多向药理学、计算生物学和网络分析的交叉学科，旨在研究药物与生物系统之间的复杂相互作用。其核心概念包括多靶点作用（药物通常作用于多个靶点而非单一靶点）、网络分析（通过构建药物-靶点-疾病-通路网络揭示相互作用）以及系统生物学（从整体角度研究生物系统的复杂性）。主要步骤包括数据收集（获取药物、靶点、疾病和通路相关数据）、网络构建（建立相互作用网络）、网络分析（识别关键节点和模块）、机制预测（预测药物作用机制和潜在靶点）以及实验验证（验证预测结果）。应用领域涵盖药物发现（识别新靶点和药物组合）、药物重定位（发现已有药物的新用途）、个性化医疗（优化个体治疗方案）和中药现代化（研究中药多成分、多靶点机制）。常用工具包括 Cytoscape、NetworkAnalyst 等，数据库有 DrugBank、KEGG、STRING 等。尽管面临数据质量、系统复杂性和实验验证等挑战，网络药理学为系统化理解药物作用提供了高效工具和方法，推动了药物研发和精准医疗的发展。

1.5.5 网络药理学的应用

网络药理学主要还是用来研究中药成分及中药配方对于某种疾病所产生的作用。中药成分方面，Liu^[41]等人研究艾叶精油成分的抗肥胖机制，网络药理分析显示，精油成分可能通过 Wnt 信号通路、PI3K-Akt 信号通路、MAPK 信号通路、催乳素信号通路、cAMP 信号通路等作用于减肥。揭示了 49 种艾叶精油成分的 308 个潜在减肥靶标，超过 70%的成分与靶标的结合为中等程度相互作用，49 种艾叶精油成分识别出 5 条以上的减肥信号通路。Yi^[42]等人通过网络药理学研究玄参中的活性成分对成釉细胞瘤的潜在影响、虎杖对牙源性角化囊肿的潜在治疗作用^[43]等。用网络药理学研究的中药成分多种多样，其余还有菊花^[44]、藿香^[45]、缬草^[46]、淫羊藿^[47]等，虽然研究对象不同，但是研究方法和步骤是相同的，其步骤都是首先查询数据库查找中药的靶点，然后通过 OMIM、GeneCards 和 TTD 等数据库查询疾病靶点，构建了蛋白质相互作用网络，进行 GO 和 KEGG 富集分析，最后进行分子对接验证。

网络药理学在中药配方方面也有重要应用，中药配方中的药品种类繁多，成分复杂，而且各成分在炮制也会发生化学反应。因此中药配方中的那些有效成分可以治疗疾病不易了解清楚。比如中药配方益骨汤，由补骨脂、骨碎补、淫羊藿、生地、丹参、山药组成，由于中药成分复杂、靶点多、层次广，其作用机制尚不明确，其成分和关键靶点也尚未确定，可以运用网络药理学，利用大数据进行网络分析，筛选疾病靶基因和中药复方有效成分^[48]。还有来自东汉张仲景的《伤

寒论》中的茵陈蒿汤，包含的中药为茵陈蒿、栀子和大黄。1000 多年来，茵陈蒿汤一直用于治疗各种肝脏疾病，如肝炎、胆汁性肝硬化和肝纤维化^[49]。网络药理学表明茵陈蒿汤主要调节脂质和动脉粥样硬化信号通路等，为中药复方治疗胆汁淤积的有效成分挖掘提供了新的研究思路。其它已有研究者使用网络药理学研究的中药配方还有甘草附子汤抗炎机制^[50]、三子养亲汤用于治疗呼吸系统疾病^[51]、三黄疏艾汤用于治疗腹泻和结肠炎机制等^[52]。网络药理学的诞生为中药制剂的研究和应用带来了显著积极影响，通过多靶点作用机制解析、加速新药研发、提升质量控制、促进个性化治疗、推动国际化、促进学科交叉、优化复方配伍以及推动中药现代化等方面，为中药的现代化和国际化提供了科学依据和技术支持，显著提升了中药的疗效和质量控制水平。

1.6 研究内容及目的意义

1.6.1 研究内容

首先通过代谢组学和网络药理学分析不同品种芡实的对糖尿病的调节作用。然后通过物理方法对芡实淀粉进行改性，对比用不同改性方法的芡实淀粉理化特性的区别，以及对改性前后的芡实淀粉进行理化性质的研究。通过体外消化模型的建立，比较芡实淀粉、改性芡实淀粉之间的差异，以及改性淀粉之间理化特性差异的消化特性差异。制作低 GI 芡实代餐粉以及芡实麦棒，对开发的芡实产品进行体外消化分析、滋味评价以及功能性分析，为芡实的开发提供理论基础。

1.6.2 研究目的及意义

近年来，我国“三高”人群数量不断增长。若从日常饮食入手可以辅助防治糖尿病，从而控制住我国糖尿病的蔓延趋势。通过科学的方法和手段优化淀粉结构，进而控制其消化特性，是淀粉产品发展的重要方向。研究表明，芡实富含淀粉，其中抗性淀粉含量较高，是提供淀粉和制备抗性淀粉的良好原料，但一直未得到有效合理的利用。如今，人们对于功能性产品的需求增大，抗性淀粉（或增抗淀粉）产品在国内工业化进程缓慢，市场上产品较少。我国目前缺少较为绿色、高效、节能的淀粉增抗方法，也未确定适合我国抗性淀粉生产的淀粉原料。因此，寻找制备抗性淀粉的良好原料和优化绿色高效的抗性淀粉制备工艺是目前亟须解决的两大问题。

抗性淀粉应用前景广大，因此探索制备改性淀粉的原料和优化其制备工艺显得尤为重要。本文以芡实为原料，采用多种方法，包括微波、超声、酶解、糊化回生等制备改性芡实淀粉并对制备工艺进行优化，通过体外消化模拟建立芡实淀

粉、改性淀粉的消化动力学模型并比较差异，通过模拟食品中的淀粉体系，分别探究纯化后的芡实改性淀粉对未处理的芡实淀粉。最后复配低 GI 芡实类食品，并研究其功能性。本文旨在促进芡实改性淀粉及芡实类食品功能化、产业化发展，推动芡实的工业化进程。

第2章 代谢组学及网络药理学分析芡实中活性成分及其对糖尿病的作用

2.1 前言

糖尿病是影响人类寿命的主要危险因素之一，2021年，全球有 5.29×10^8 糖尿病患者^[53]，中国是世界糖尿病病人最多的国家，糖尿病及糖尿病前期发病率已过 50%。预防糖尿病的首位措施就是生活方式干预，饮食干预就是其中一种^[54]。

人们对于芡实作用的研究包括益肾固精健脾止泻等^[55]，也包括其降血糖的作用^[56]。但是对于不同品种的芡实降血糖效果的研究较少。因此可以借助新的方法对芡实进行研究。

代谢组学和网络药理学已成为揭示生物系统复杂功能和行为的强大工具，在药食同源食品（铁皮石斛^[57]、天麻^[58]等）加工过程中的成分及药理活性变化已有研究。

本研究拟基于四极杆飞行时间液质联用（LC-QTOF-MS）技术对芡实中物质成分进行系统研究，采用代谢组学方法鉴定其差异代谢物，采用代谢分析工具富集代谢通路。然后应用网络药理学方法，挖掘出与糖尿病有关的靶点，用 Cytoscape 软件构建代谢组学与网络药理学的集成网络。最后，对得到的关键靶标进行分子对接验证。

本研究将对芡实干预糖尿病进行理论研究，为芡实功能性产品开发及生产加工提供理论基础。

2.2 材料与仪器

2.2.1 材料与试剂

芡实分别为未剥皮干燥的刺芡（S1）来自广东肇庆；剥皮干燥的刺芡（S2）来自苏北洪泽湖；剥皮干燥的苏芡（S3）来自苏州吴中区角直镇；剥皮干燥的苏芡（S4）来自苏州吴中区东山镇。

甲醇（CH₃OH），分析纯，国药集团化学试剂有限公司产品。

2.2.2 仪器与设备

表 2-1 实验仪器
Table 2-1 Experimental instruments

仪器	型号	厂家
高效液相色谱	1260 Infinity III Prime	美国安捷伦科技有限公司
飞行时间质谱	AB SCIEX TOF 5600+	美国安捷伦科技有限公司
旋转蒸发仪	RE52-A	上海亚荣生化仪器厂
真空冷冻干燥机	FD-1A-50	北京博医康实验仪器有限公司
台式低速离心机	2-6C	湖南可成仪器设备有限公司

2.3 试验方法

2.3.1 LC-QTOF-MS 分析茭实提取液

将苏茭、刺茭冻干后，研磨成粉末状。以甲醇为溶剂分别溶解质量相同（0.1 g）的茭实粉末，振荡提取 30 min，6000 r/min 离心 15 min 取上清液，沉淀再次振荡提取、离心，取上清液，将 2 次上清液合并，并进行减压浓缩，以得到无醇味的茭实提取液。参考 Mu 等^[59]的方法，调整 LC-QTOF-MS 的色谱条件和质谱条件，得到试验数据。对 LC-QTOF-MS 实验数据进行整理分析，利用 MS-DI-AL 软件，将试验数据与数据库数据进行比对鉴定化合物。使用 Metaboanalyst 6.0 和 TBtools 2.029 软件绘制主成分（PCA）分析图和热图（HeatMap）。通过方差分析（ANOVA）对差异代谢物进行筛选，然后检索 PubChem 数据库（<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>）获取成分标识号（CID）及分类信息，通过 Lipinski 原则筛选出有更好的药代动力学的物质，查阅文献获取各成分作用的信息，选择苏茭和刺茭中有显著含量差异的成分用于进一步研究。

2.3.2 茭实成分靶点及糖尿病作用靶点的筛选

在 Swiss Target Prediction（<http://www.swisstargetprediction.ch/>）网站，以智人（Homo sapiens）为研究物种，输入从 PubChem 数据库中获取的各成分的 Smiles 结构式，检索得到该成分可能作用的靶点蛋白质。搜集所有成分的作用靶点取并集得到苏茭和刺茭的作用靶点信息。

以“Diabetes”为检索词分别在 GeneCards 数据库（<https://www.genecards.org/>）、TTD 数据库（Therapeutic Target Database）及 OMIM 数据库（<https://www.omim.org/>）中进行检索，搜集所有靶点并去除其中的重复靶点，得到与糖尿病有关的所有靶点信息。

2.3.3 构建蛋白质互作 (PPI) 网络

选择“Homo sapiens”为研究物种，分别将苏芡和刺芡的作用靶点数据输入到 STRING12.0 数据库中进行检索，导出 PPI 图。并下载蛋白质互作数据导入到 Cytoscape 3.8.2 软件，通过 CytoNCA 插件计算出该互作网络中各靶点度值 (Degree)。选择 Degree 较大的靶点并查找其对应成分，重绘 PPI 图凸显关键靶点。

2.3.4 GO 富集分析及 KEGG 富集分析

将活性成分干预糖尿病的靶点蛋白质借助 David 数据库 (<https://david.ncifcrf.gov/>) 中的 Functional Annotation Chart 进行检索，选择“Homo sapiens”物种，收集 GOTERM_BP_DIRECT、GOTERM_CC_DIRECT、GOTERM_MF_DIRECT 和 KEGG_PATHWAY 数据；再使用 Bioinformatics (<https://www.bioinformatics.com.cn/>) 网站中的“富集气泡图工具”及“BP, CC, MF 三合一分析工具”对靶点进行信号通路富集分析。

2.3.5 分子对接验证

配体文件：在 PubChem 数据库下载靶点蛋白质对应成分的 sdf 格式的 3D 结构文件，通过 OpenBabel 3.1.1 软件转化为 pdb 格式并且保存。受体文件：在 RCSB PDB (<https://www.rcsb.org/>) 网站检索靶点蛋白质并勾选“Homo sapiens”进行筛选，在检索结果中选择分辨率最高的蛋白质结构，下载为 pdb 格式文件，使用 Pymol 2.6 软件，对蛋白质结构进行去水以及去除包含的其他配体，保存为 pdbqt 格式。通过 AutoDock4 对大分子蛋白质加氢、计算电荷数等；对小分子配体进行显示扩展性处理。使用 autogrid4 生成受体网络，使用 autodock4 进行分子对接，完成对接后进行结构分析，选择结合能为负值且数值最小的分子对接结构，最后通过 Pymol 2.6 软件标记出结合位点，计算出分子间距离，输出对接结构图。

2.4 结果与分析

2.4.1 代谢组学分析

如图 2-1 所示，由 PCA 图中可以看出，S1 和 S2 在化学组成及其成分含量方面存在较小差异。而 S3 和 S4 与 S1、S2 存在着较为显著的差异。对 S1、S2、S3、S4 共 4 组样品的峰面积大小进行方差分析，经过去重筛选，结果显示，228 种成分的含量存在显著差异。按 Lipinski 原则 (脂水分配系数 ($mLogP$) ≤ 5 ，氢键给体 ($nOHNH$) ≤ 5 ，氢键受体 (nOH) ≤ 10)，将主要成分筛选出来。最终筛选

得到 153 种成分。对 153 种成分进行层次聚类分析，结果如图 2-2 所示。从整体看，苏芡中 129 种成分的含量显著高于刺芡，其中包括多种氨基酸，如人体必需氨基酸（色氨酸、赖氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、苏氨酸），核酸及其衍生物（胞苷、鸟嘌呤、胸腺嘧啶、尿嘧啶、尿苷等），维生素及其衍生物（烟酸、胆碱、吡哆醇、硫胺素、泛酸）以及其他重要的活性物质（表儿茶素、培哌普利、阿糖胞苷、劳拉西洋等）。不同品种芡实成分具有显著差异，苏芡有机成分含量明显优于刺芡。而对于同一品种不同地区的苏芡，其成分也有显著差异。根据聚类热图（图 2-2）分析，S3 成分中，多种氨基酸及其衍生物、维生素及其衍生物含量高于 S4。而 S4 中单糖成分半乳糖的含量高于 S3。同一芡实品种成分在不同地区产生显著差异的原因是不同产地的气候、土壤、光照因素影响植物无机成分含量，而无机成分又影响着芡实中有机物成分的合成及生理功能的调控，从而导致芡实中的有机成分产生显著差异^[60]。

图 2-2 显示，不同品种芡实有 153 种成分含量存在显著差异，查询相关文献，找出各成分的作用，找出了 15 种具有降血糖或改善糖尿病神经性疼痛功能的成分。其中 12 种在苏芡中具有较高含量，3 种在刺芡中具有较高含量，将 15 种成分进行注解，如表 2-2 所示。芡实中的活性成分不但可以调节血糖还可以抗肿瘤、抗炎、抗氧化、抗细胞损伤以及保护神经。其中多数活性成分在苏芡中的含量较高，因此苏芡相比刺芡可能会有更好地辅助降血糖效果。

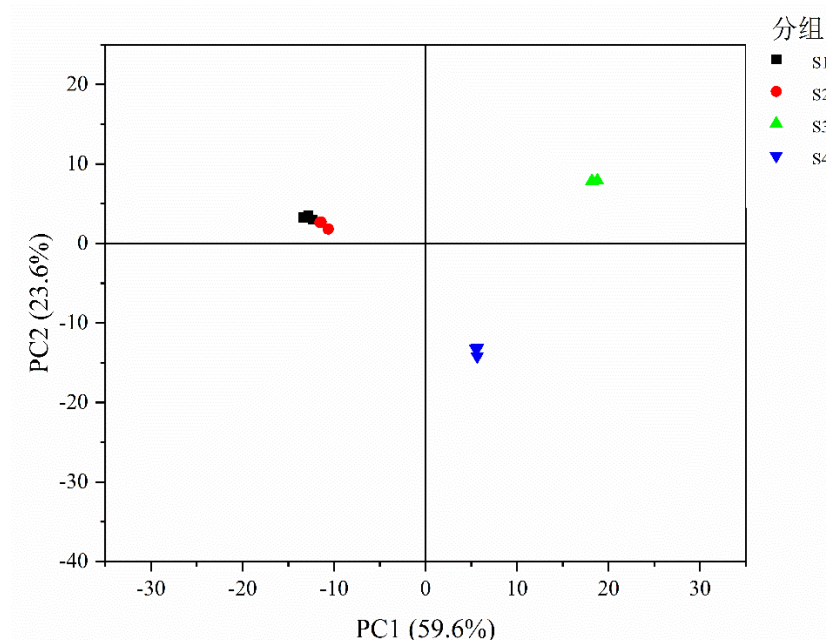


图 2-1 苏芡及刺芡的差异成分的主成分分析图

Fig. 2-1 Principal component analysis of the difference components between South Euryale and North Euryale

表 2-2 苏芡及刺芡的差异性成分及功能

Table 2-2 Differential composition and function of South Euryale and North Euryale

	化合物名	化合物英文名	成分标识号	分子式	功能
苏芡	钩吻素子	Koumine	1020044	C ₂₀ H ₂₂ N ₂ O	减轻类风湿关节炎
			13		[61]、调节糖尿病神经性疼痛[62]、抗细胞损伤[63]
	(+)-辛可宁	(+)-Cinchonine	90454	C ₁₉ H ₂₂ N ₂ O	降血糖[64]抗肿瘤[65]
	甘草苷	Liquiritin	503737	C ₂₁ H ₂₂ O ₉	降血糖[66]、抗肿瘤[67]
	DL-3-氨基异丁酸	DL-3-Aminoisobutyric acid	64956	C ₄ H ₉ NO ₂	降血糖[68]、抗细胞损伤[69]
	硫胺素	Thiamine	1130	C ₁₂ H ₁₇ N ₄ OS+	降血糖[70]、抗氧化[71]、肾脏保护[72]等
	葫芦巴碱	Trigonelline	5570	C ₇ H ₇ NO ₂	降血糖[73]、神经保护[74]等
	丹参酮 IIA	Tanshinone Iia	164676	C ₁₉ H ₁₈ O ₃	降血糖[75]、抑制神经损伤[76]、抗肿瘤[77]等
	鞣花酸	Ellagic Acid	5281855	C ₁₄ H ₆ O ₈	降血糖[78]、抗肿瘤[79]
	甜菜碱	Betaine	247	C ₅ H ₁₁ NO ₂	降血糖[80]、抗炎[81]
	1,2,3-苯三酚	Pyrogallol	1057	C ₆ H ₆ O ₃	抑制 α -葡萄糖苷酶[82]、抗氧化[83]
	北美圣草素	Eriodictyol	440735	C ₁₅ H ₁₂ O ₆	促胰岛素分泌[84]
刺芡	瓜氨酸	Citrulline	9750	C ₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	降血糖[85]、抗炎[86]、维护心血管健康[87]
	柚皮素	Naringenin	439246	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	调节血糖[88]、抗炎[89]
	没食子酸	Gallic acid	370	C ₇ H ₆ O ₅	降血糖、抗脂质过氧化和抗氧化[90]
	东莨菪亭	Scopoletin	5280460	C ₁₀ H ₈ O ₄	抑制 α -葡萄糖苷酶[91]、抗炎[92]

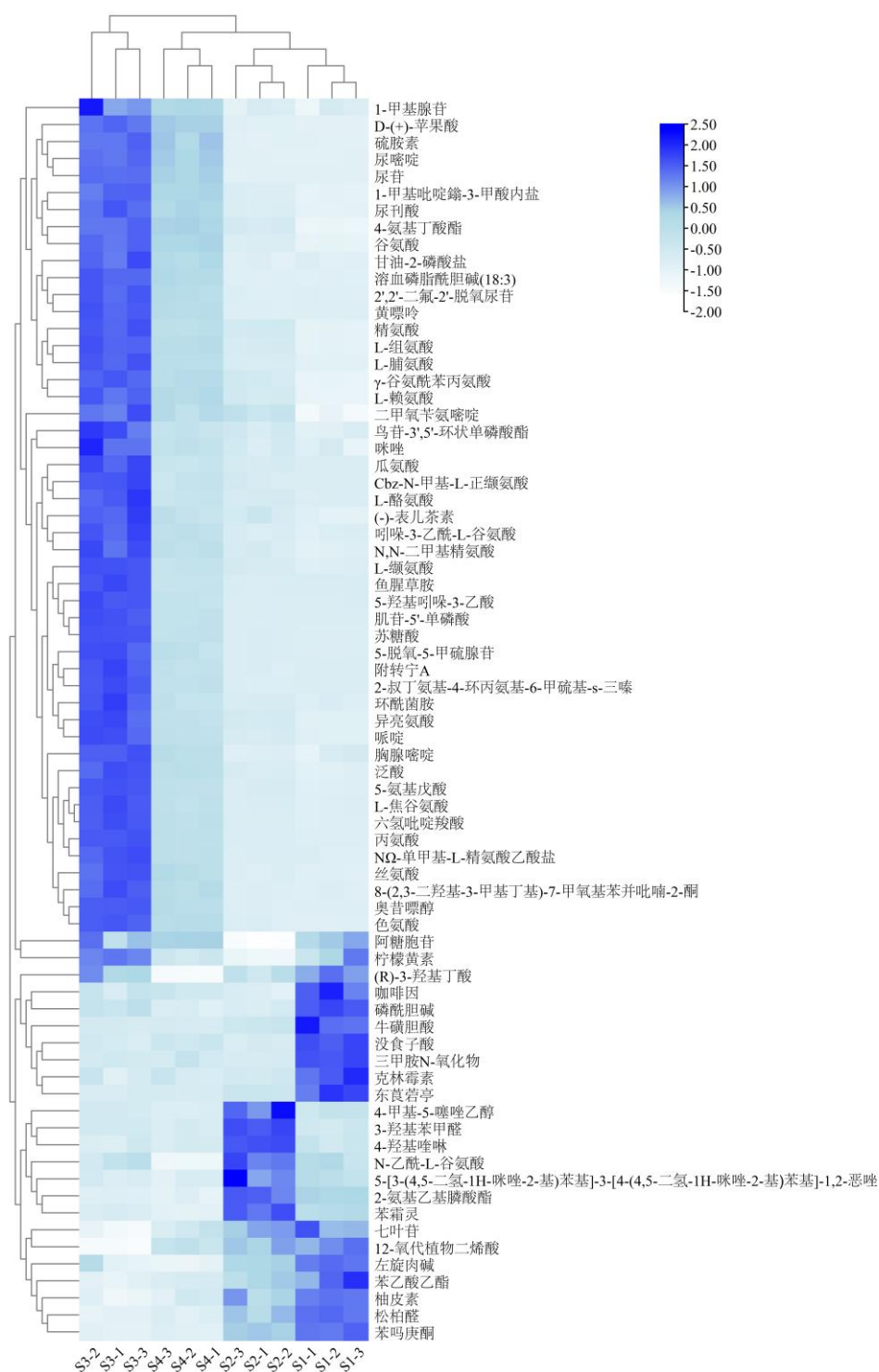


图 2-2 苏茛及刺茛的差异成分的聚类热图

Fig. 2-2 Clustered heatmap of the difference components of South Euryale and North Euryale

2.4.2 茛实成分靶点及糖尿病作用靶点的筛选结果分析

分别将苏茛中的 12 种成分的 Smiles 化学结构上传到 Swiss Target Prediction

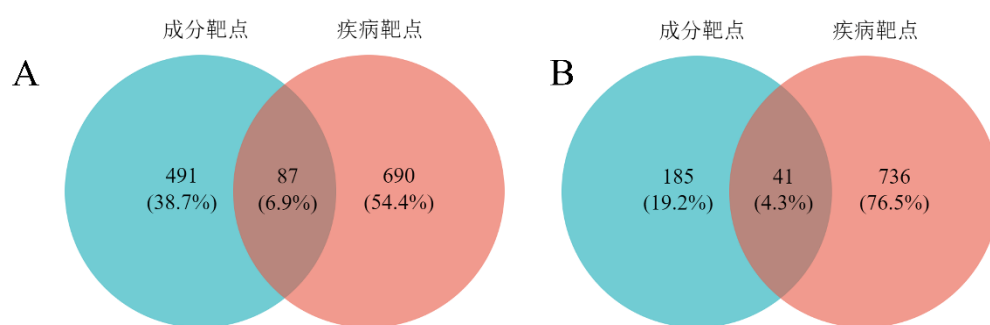


Fig. 2-3 Venn diagram of euryale ferox components and diabetes

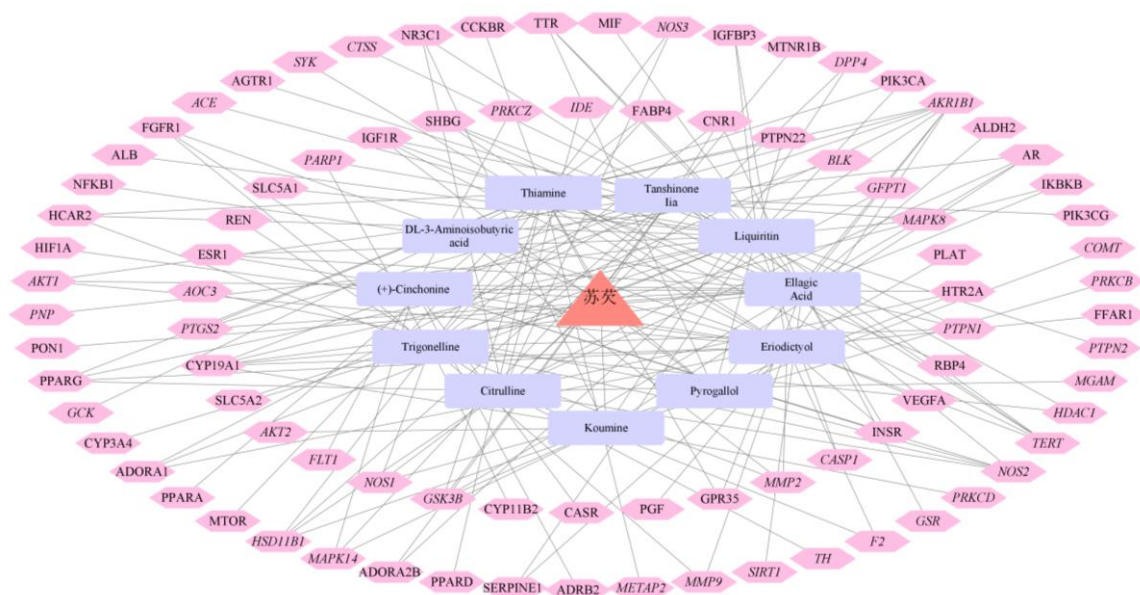


Fig. 2-4 South Euryale ingredient-target network diagram

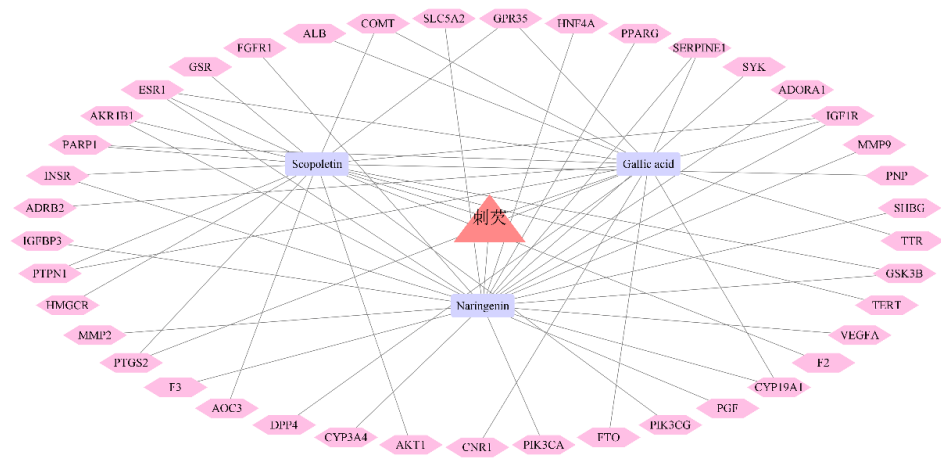


图 2-5 刺芡成分-靶点网络图

Fig. 2-5 North Euryale ingredient-target network diagram

2.4.3 构建 PPI 网络结果分析

将苏芡和刺芡成分的潜在作用靶点分别与糖尿病靶点的交集靶点上传至 STRING12.0 数据库中，获取靶点间作用关系图。再把数据导入 Cytoscape，利用 CytoNCA 插件计算出该互作网络中各靶点度^[94]值，筛选度值的平均值的 2 倍作为核心靶点，绘制网络图，突出核心靶点以浅紫色显示（图 2-6）。图 2-6A 和图 2-6B 分别为苏芡、刺芡成分干预下的糖尿病靶点相互作用网络图。其中苏芡中核心靶点 9 个，刺芡中核心靶点 3 个，见表 2-3。

表 2-3 苏芡及刺芡干预糖尿病的核心靶点

Table 2-3 The core targets of intervention for diabetes by South Euryale and North Euryale			
品种	序号	靶点	度值
苏芡	1	AKT1	126
	2	ALB	120
	3	PPARG	116
	4	PTGS2	88
	5	NFKB1	86
	6	HIF1A	86
	7	MMP9	84
	8	ESR1	80
	9	SIRT1	78
刺芡	10	ALB	64
	11	AKT1	64
	12	PPARG	60

注：AKT1：丝氨酸/苏氨酸激酶 1；ALB：白蛋白；PPARG：过氧化物酶体增殖激活受体 γ ；PTGS2：前列腺素内过氧化物合酶 2；NFKB1：核因子 κ B 亚基 1；HIF1A：缺氧诱导因子 1 亚基 α ；MMP9：基质金属肽酶 9；ESR1：雌激素受体 1；SIRT1：去乙酰化酶 1。

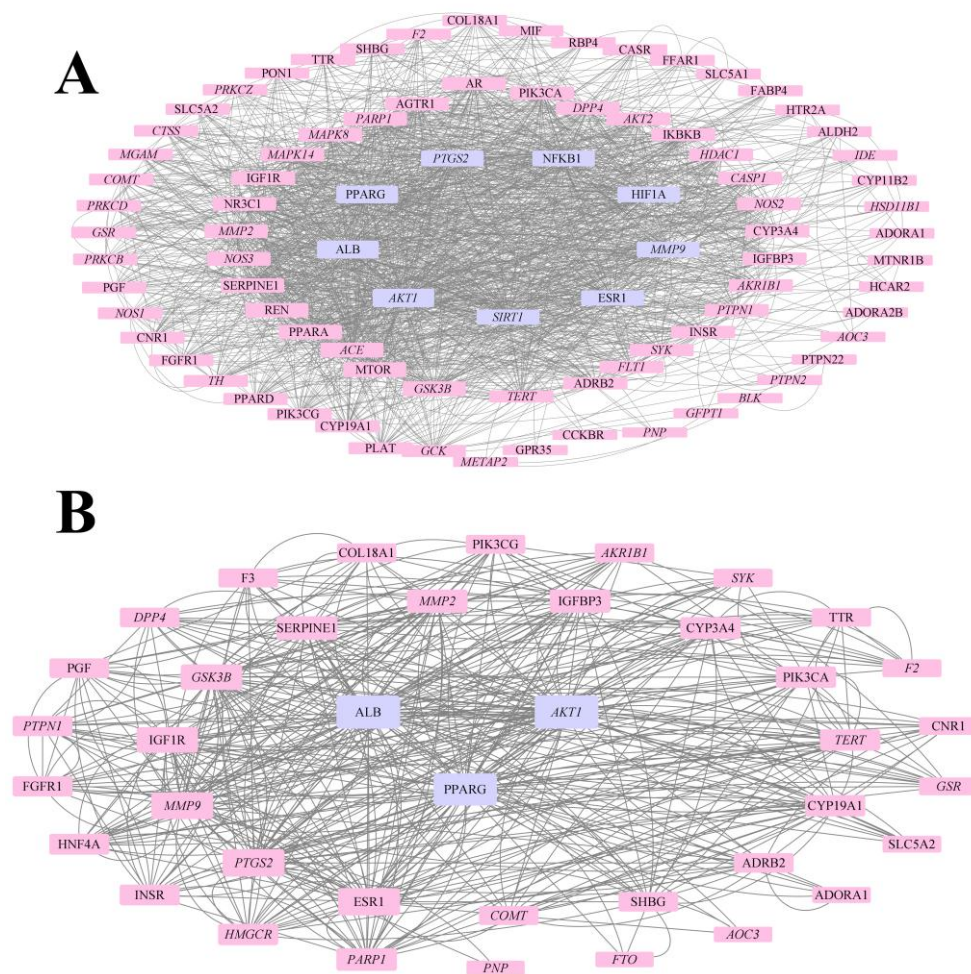


图 2-6 苏苾靶点间关系图 (A) 与刺苾靶点间关系图 (B)

Fig. 2-6 The relationship diagram between the targets of South Euryale (A) and the relationship diagram between the targets of North Euryale (B)

2.4.4 GO、KEGG 富集结果分析

在苏苾关键靶点 GO 富集中, 生物过程 (BP) 有 20 条功能途径; 细胞定位 (CC) 有 47 条功能途径; 分子功能 (MF) 有 107 条功能途径。因此苏苾成分中的 12 个关键靶点通过 GO 富集共获得 174 条功能途径。同样在刺苾关键靶点 GO 富集中, BP、CC、MF 分别有 168 条、23 条、54 条功能途径。刺苾成分中 3 个关键靶点共有 245 条 GO 富集功能途径。分别选择苏苾、刺苾中 BP、CC、MF 的 P 值最小的前 10 个 ($P < 0.01$) 绘制气泡图和 GO 富集分析图。苏苾干预糖尿病靶点基因富集分析结果见图 2-7 及 2-9, 刺苾干预糖尿病靶点基因富集分析结果见图 2-8 及 2-10。

由图 2-7 可知, 苏苾成分干预糖尿病的靶点主要参与了对细胞凋亡过程的负调控、基因表达的负调控过程, 以及积极调节细胞增殖, 其次也参与了对缺氧的

反应、血管生成、葡萄糖稳态、肽基丝氨酸磷酸化等生物过程。这些靶点主要集中在质膜、细胞质、细胞核、外泌体、细胞外区、线粒体、大分子复合物、胞膜窖等部位，具有相同的蛋白质结合、蛋白质丝氨酸/苏氨酸/酪氨酸激酶活性、酶结合、蛋白激酶结合、蛋白激酶活性、转录辅激活因子结合、类固醇结合、胰岛素受体底物结合、四氢生物蝶呤结合等功能。由图 2-9 可知，苏芡成分干预糖尿病的靶点主要集中在糖尿病性心肌病、胰岛素抵抗、糖尿病并发症中的糖尿病并发症中的高级糖基化终末产物-受体信号通路、癌症中的通路、HIF-1 信号通路、前列腺癌、松弛素信号等通路。由图 2-8 可知，刺芡成分干预糖尿病的靶点参与了对丝裂原活化蛋白激酶级联的正向调控、蛋白激酶 B 信号的正向调节过程，以及参与血管生成、基因表达的负调控、胰岛素受体信号通路、葡萄糖稳态等过程，这些靶点主要集中在细胞膜、细胞外区、外泌体等。具有蛋白质结合、蛋白质同源二聚作用、蛋白质丝氨酸/苏氨酸/酪氨酸激酶活性、酶结合、丝氨酸型内切肽酶活性、激酶活性、蛋白酶结合、胰岛素受体底物结合、胰岛素样生长因子 I 结合等功能。图 2-10 显示，这些靶点主要富集在癌症通路、磷酸腺苷活化蛋白激酶信号通路、脂肪细胞的脂肪分解调节信号通路、糖尿病性心肌病信号通路、磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B 信号通路等。

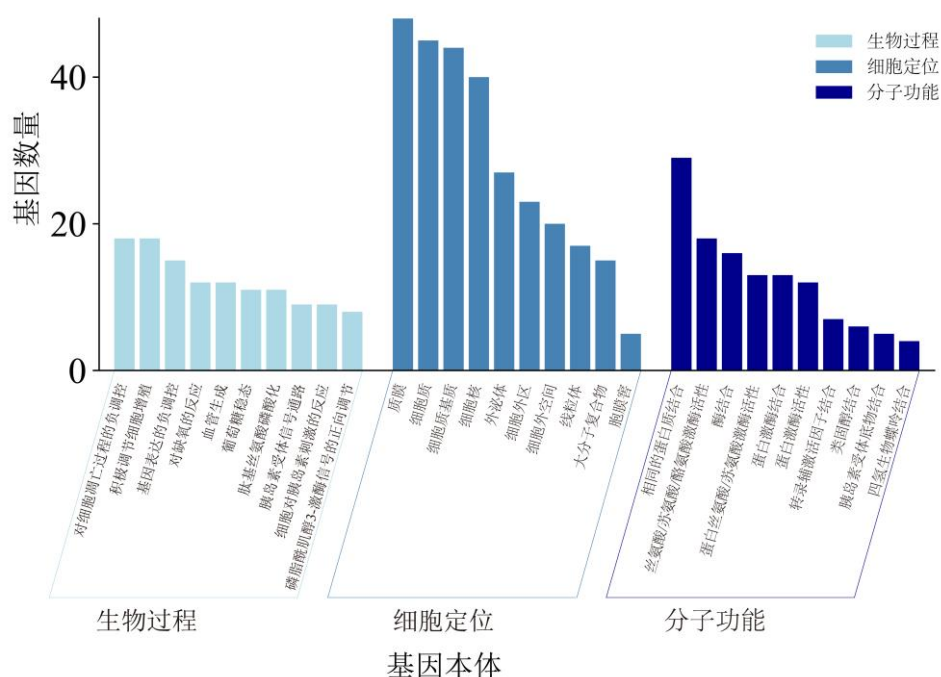


图 2-7 苏芡 GO 富集分析

Fig. 2-7 South Euryale GO enrichment analysis

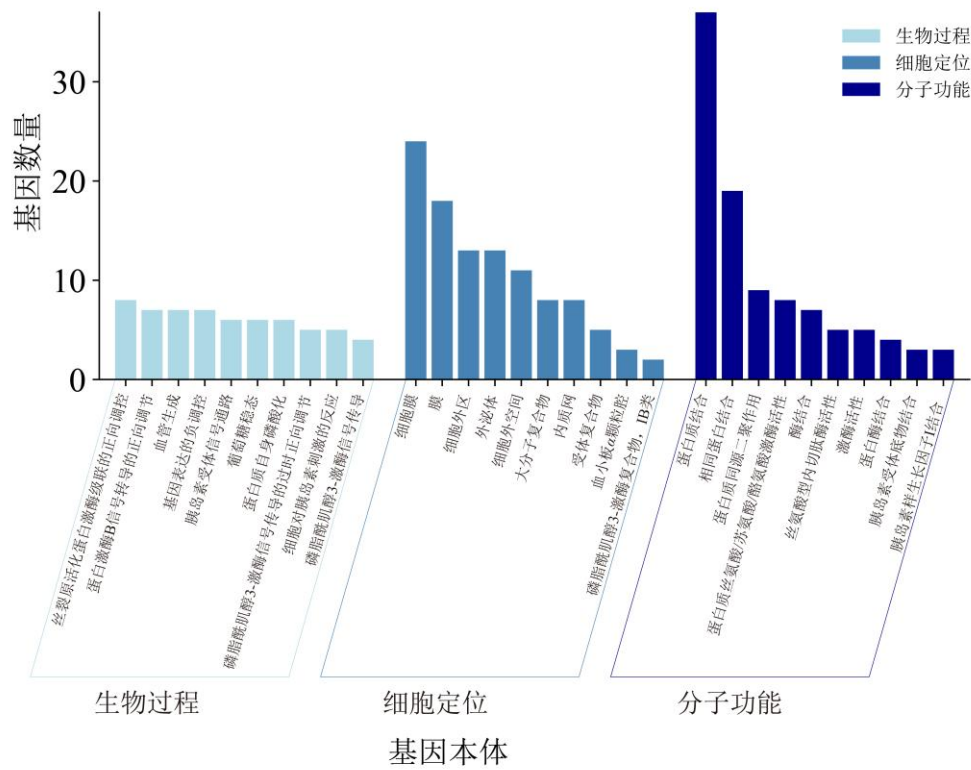


图 2-8 刺芡 GO 富集分析
Fig. 2-8 North Euryale GO enrichment analysis

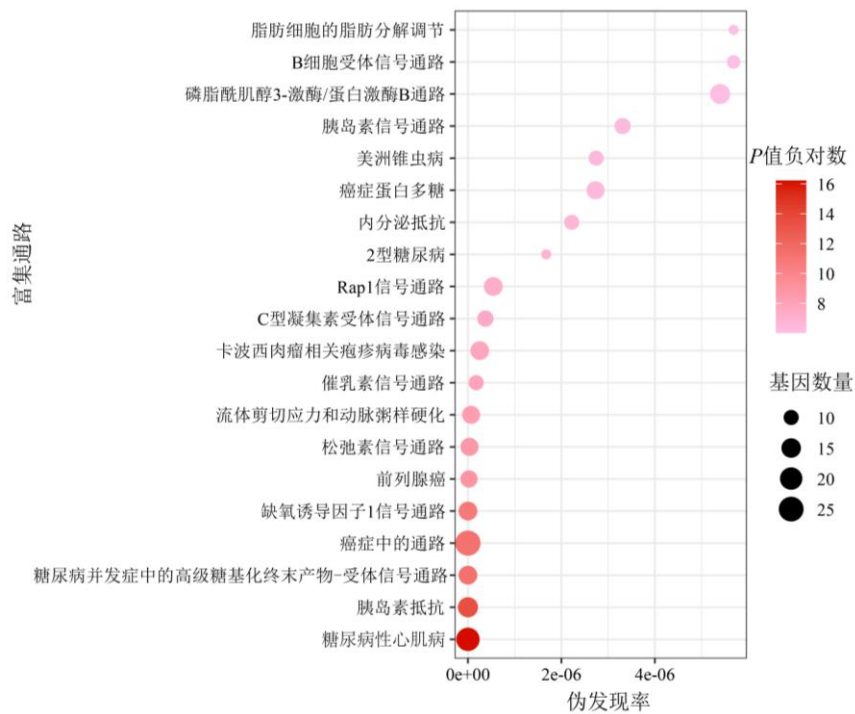


图 2-9 苏芡 KEGG 富集分析
Fig. 2-9 South Euryale KEGG enrichment analysis

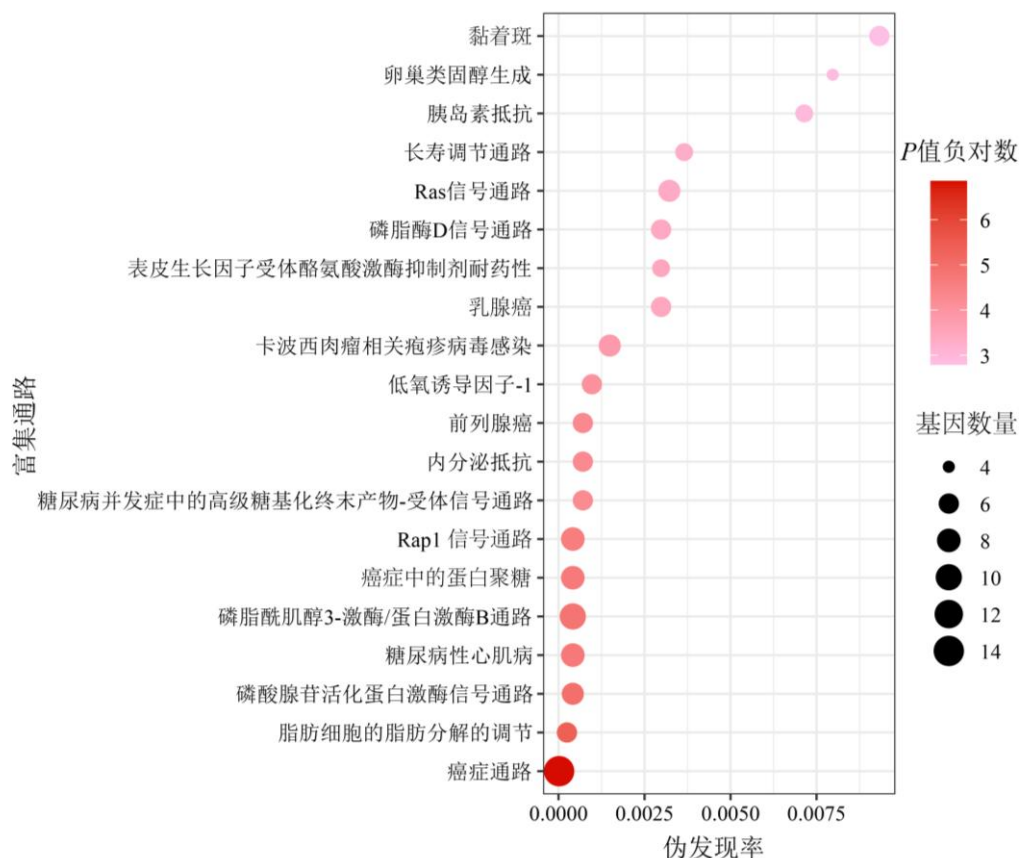


图 2-10 刺芡 KEGG 富集分析

Fig. 2-10 North Euryale KEGG enrichment analysis

2.4.5 分子对接分析

成分-靶点网络图显示，苏芡中有 9 个关键靶点，但是由于 1 个成分对应多个靶点，因此选择所对应的成分为硫胺素、瓜氨酸、丹参酮 IIA、北美圣草素、甘草苷、鞣花酸、葫芦巴碱，选择这些成分对应的靶点进行分子对接验证，分别为过氧化物酶体增殖物活化受体 γ (PPARG)、蛋白激酶 B (AKT1)、白蛋白 (ALB) 以及基质金属蛋白酶-9 (MMP9)。同理在刺芡成分 PPI 网络中，选择 ALB、PPARG 以及 AKT1 所对应的没食子酸、柚皮素、东莨菪亭进行分子对接验证。所有分子对接的能量均为负值，同时每个成分都结合在靶点蛋白质的凹陷处（图 2-11），说明芡实成分与靶点蛋白质可以自发的结合，推测每个组分在细胞内都可以与靶点自发结合形成二元复合物。

2.5 讨论

对苏芡和刺芡的成分进行代谢组学分析，结果显示，苏芡与刺芡中存在 153 种含量显著差异的代谢物，在苏芡、刺芡中与干预糖尿病有关的成分含量分别有 12 种和 3 种存在显著差异。正是这些差异物使苏芡和刺芡在外观及功效方面存

在差异，在降血糖方面效果不同。

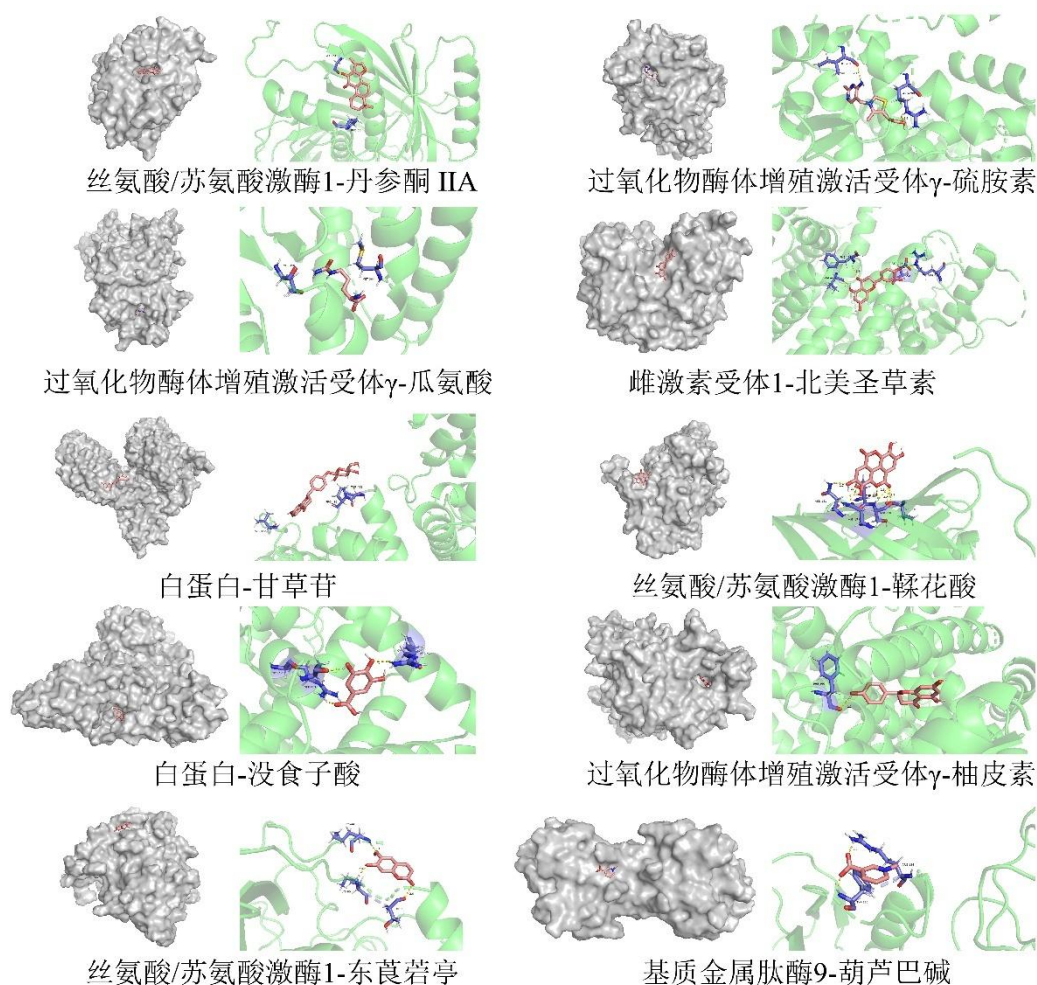


图 2-11 芡实成分与关键靶点蛋白质分子对接模型图

Fig. 2-11 Docking model diagram of the interaction between the components of Euryale Ferox and key target protein molecules

在 S1 中，左旋肉碱的含量更高，左旋肉碱具有多种功能，包括降脂^[95]、益精^[96]、保护脊髓^[97]等作用。与 S2 相比，S1 还具有更高含量的没食子酸和七叶苷。没食子酸具有抗肿瘤^[98]、抗氧化^[99]等作用；七叶苷具有抗氧化^[100]、抗肿瘤^[101]等作用。尽管 S1 中含有多种对人体健康有益的活性成分，但其含有的三甲胺-N-氧化物会对机体产生严重的危害，研究结果表明三甲胺-N-氧化物与心血管疾病有关^[102]，甚至与心肌梗死有较强的临床相关性^[103]。这是可能因为三甲胺-N-氧化物主要是由芡实内部生长的微生物产生的，它们分解芡实中的氮化合物时会产生三甲胺-N-氧化物^[104]。由于芡实表皮与外界接触面积大，同时也是芡实中微生物生长的场所，所以芡实表皮中的三甲胺-N-氧化物的含量相对较高。而去皮后，芡实的表皮被去除，其中的微生物也被去除，因此去皮芡实中的三甲胺-N-氧化

物含量相对较低。

通过查阅文献及检索数据库对差异成分进行功能性比较,结果表明,苏芡具有更好的降血糖效果。在苏芡中甘草苷、北美圣草素、鞣花酸、硫胺素存在较多靶点,在关键靶点筛选中,关键靶点所对应的成分为丹参酮 IIA、北美圣草素、鞣花酸、甘草苷、瓜氨酸等,因此丹参酮 IIA、北美圣草素、鞣花酸、甘草苷、瓜氨酸等在调节血糖中起到主要作用。北美圣草素可以刺激小鼠胰岛和 MIN6 细胞分泌胰岛素,从而在治疗糖尿病及相关并发症的药物中存在重要性。丹参酮 IIA 的抗氧化和神经保护特性可用于缓解糖尿病最常见的并发症神经病变,治疗糖尿病引起的神经功能障碍以及修复对热和机械损伤的感知能力^[105]; Amin 等^[78]通过研究经高脂高糖诱导的 2 型糖尿病大鼠发现,鞣花酸显著改善了大鼠血糖平衡,增强了胰岛素信号传导; Zhang 等^[106]研究发现,甘草苷可以有效降低小鼠被喂养果糖引起的脂质积累和胰岛素抵抗,并且甘草苷通过抑制核因子活化 B 细胞 κ 轻链增强子和丝裂原活化蛋白激酶信号通路对高果糖诱导的心肌纤维化具有保护作用。另外,苏芡中的差异成分还起到抑制神经损伤、抗肿瘤、抗氧化、抗炎等作用。在刺芡中,柚皮素存在较多的靶点,在关键靶点筛选中,最关键靶点 ALB 对应成分为没食子酸。研究表明,没食子酸和对香豆酸具有明显的抗糖尿病作用,通过调节肿瘤坏死因子- α 和脂肪细胞因子分泌以及上调过氧化物酶体增殖物活化受体 γ mRNA 表达从而表现出显著的抗糖尿病作用^[107]。值得注意的是东莨菪亭可以通过抑制 α -葡萄糖苷酶从而达到辅助调节血糖的效果。

PPI 网络构建结果显示,苏芡和刺芡与糖尿病作用的关键靶点都包含 PPARG, PPARG 是脂肪细胞分化和葡萄糖稳态的关键调节因子。PPARG 是 PPAR 的 3 种亚型之一,与许多疾病病理有关,包括肥胖症、糖尿病、动脉粥样硬化和癌症^[108]。PPARG 已被证实与 2 型糖尿病有关,研究表明,PPARG H449L 突变与胰岛素抵抗、高甘油三酯血症和非酒精性脂肪肝等疾病相关^[109],发生突变个体更易罹患显性糖尿病。有研究人员认为,通过 PPARG 编码基因中的变异预测个体患 2 型糖尿病的风险^[110]。在苏芡中 PPARG 对应 4 种成分,分别为硫胺素、瓜氨酸、北美圣草素、甘草苷;在刺芡中对应柚皮素。苏芡中包含更多 PPARG 靶点结合成分。另外苏芡中 AKT1 靶点由胰岛素和多种生长存活因子激活,在调节细胞生长、分裂和抑制细胞凋亡等多种过程中发挥着关键作用。

在 GO 富集以及 KEGG 富集中,苏芡中的靶点主要富集在糖尿病性心肌病、胰岛素抵抗等信号通路,刺芡中的靶点主要富集在癌症的发病途径、脂肪细胞脂解的调控、AMPK 信号通路。因此苏芡中不仅存在更多能显著降血糖的成分,其

靶点集中性也与治疗糖尿病得需求更贴近。

2.6 本章小结

综上所述，本章研究基于代谢组学研究不同品种芡实中的差异成分，基于网络药理学筛选功能性成分并进行分子对接技术验证，结果表明，干预糖尿病的差异性成分数量在苏芡中更多。在苏芡、刺芡中与干预糖尿病有关的成分含量分别有 12 种和 3 种存在显著差异。本研究结果为芡实干预糖尿病的研究提供了新的思路，为芡实低 GI 产品的研制提供了理论基础。

第 3 章 微波压热与超声酶解的芡实淀粉结构特征与理化特性变化

3.1 前言

抗性淀粉指无法被健康的小肠所消化吸收的淀粉。采用物理、化学和酶法处理可以增加抗性淀粉含量，超声和微波技术常作为物理方法的一种^[111]，研究发现，超声波具有化学、热、机械效应等，对淀粉的流变、糊化等特性以及结构和稳定性有一定的影响^[112]。微波具有热效应与非热效应，非热效应主要作用于淀粉分子中的极性化学键及基团，使分子发生极性运动造成分子间的结构变化；热效应使淀粉糊化，形成分子间或分子内氢键^[113]，提高抗性淀粉得率。在芡实淀粉改性处理方面，研究者多采用压热处理^[114]、挤压膨化处理^[115]及酶法改性处理^[116]，尽管单一方法对淀粉改性的研究非常成熟，但是抗性淀粉得率不高，因此联合微波、超声改性，以期发挥协同增效作用。目前关于芡实淀粉改性后的结构与理化特性研究较少，本研究通过比较单一实验处理和增强实验处理，比较芡实淀粉的结晶度、短程有序性等以及析水率、持水率、溶解度、膨胀度及抗性淀粉含量等理化特征，将加强对芡实淀粉的了解，推动芡实在食品工业中的应用。

3.2 材料与仪器

3.2.1 材料与试剂

表 3-1 实验试剂

Table 3-1 Experimental reagents

试剂/材料	级别	厂家/地区
猪胰 α -淀粉酶	20000 U/mL	上海源叶生物科技有限公司
糖化酶	100000 U/g	上海源叶生物科技有限公司
普鲁兰酶	1000 npun/g	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
醋酸钠缓冲液	AR	国药集团化学试剂有限公司
无水乙醇	AR	国药集团化学试剂有限公司
直链淀粉试剂盒	-	北京索莱宝科技有限公司
淀粉试剂盒	-	北京索莱宝科技有限公司
葡萄糖试剂盒	-	北京索莱宝科技有限公司
新鲜芡实	-	苏州市吴中区

3.2.2 仪器与设备

表 3-2 实验仪器
Table 3-2 Experimental instruments

仪器	型号	厂家
电子天平	ME104E	梅特勒托利多国际有限公司
冷场发射扫描电镜	SU8010	日立分析仪器（上海）有限公司
傅立叶红外光谱仪	Nicolet iS20	赛默飞世尔科技公司
X 射线衍射仪	SmartLab SE	微纳科技有限公司
质构仪	FTC	北京盈盛恒泰科技有限责任公司
恒温恒湿箱	ZXMP-R1430	上海智城分析仪器制造有限公司
双光束紫外可见分光光度计	TU-1900	北京普析通用仪器有限责任公司
微波炉	EG720KG4-NA	美的集团
超声波清洗器	KQ-500DE	昆山市超声仪器有限公司

3.3 实验方法

3.3.1 改性淀粉的制备

原淀粉（YDF）提取：称取芡实 75 g 粉碎，与 0.05%亚硫酸钠和 0.5%乳酸及 225 mL 的蒸馏水混合均匀，浸泡 1 h（50 ℃）。去除上清液，加蒸馏水洗至芡实为中性，去除上清液。芡实加 150 mL 水用打浆机打浆，打浆过筛（200 目），重复 3 次。将滤液倒在 50 mL 离心管中离心（3000 r/min，4 ℃，15 min）去除上清液。称取 0.03 g 质量分数为 0.02%的氢氧化钠溶解于 150 mL 水中，将其加入沉淀中，并搅拌成悬浊液。在 4 ℃的条件下静置 1 h，离心（3000 r/min，4 ℃，15 min），去除上清液，将沉淀置于 50 ℃的恒温干燥箱中干燥 2.5 h，然后将干燥物粉碎过筛（100 目），即为芡实淀粉。

改性淀粉制备工艺参数均由实验室前期响应面实验设计结果所得。①微波压热改性淀粉（WY），制备参数：配制淀粉乳浓度 16.5%，90 ℃糊化 30 min，在微波（功率 700 W，输出率 100%，时间 100 s）下处理，在蒸汽灭菌锅 121 ℃压热 30 min，冷却至室温，在 4 ℃下回生 24 h，80 ℃干燥 12 h；②超声酶解改性芡实淀粉(CM)，配制淀粉乳浓度 22%，然后超声（频率：40 KHz，时间：38 min）处理，用 0.05 mol/L HCl 调整 pH 值至 5.5，加入 21 npun/g 普鲁兰酶，在 60 ℃下水浴 24 h，冷却至室温，在 4 ℃下回生 24 h，冷冻(冷胼温度为-78 ℃，真空压力为 0.1 Pa)干燥 48 h。以上两种改性技术中均涉及淀粉乳浓度，因此分别做了淀粉乳浓度 16.5%和 22%的增强改性技术，分别是③和④。③微波压热联合

超声酶解改性淀粉 (WYA), 在①的基础上进行超声 (频率: 40 KHz, 时间: 38 min) 处理, 用 0.05 mol/mL HCl 调整 pH 值至 5.5, 加入 21 npun/g 普鲁兰酶, 在 60 °C 下水浴 24 h, 冷却至室温, 在 4 °C 下回生 24 h, 冷冻(冷阱温度为-78 °C, 真空压力为 0.1 Pa)干燥 48 h; ④微波压热联合超声酶解改性淀粉 (CMA), 在②的基础上 90 °C 糊化 30 min, 在微波 (功率 700 W, 输出率 100%, 时间 100 s) 下处理, 在蒸汽灭菌锅 121 °C 压热 30 min, 冷却至室温, 在 4 °C 下回生 24 h, 80 °C 干燥 12 h。

3.3.2 表面颗粒形态分析

将少量干燥处理后的淀粉样品均匀地涂抹在预先固定于扫描电子显微镜 (SEM) 载物台上的双面胶带上。随后, 对涂抹好的淀粉样品进行金属镀膜处理, 以提高其导电性能。完成镀膜后, 将载物台置于扫描电子显微镜内, 并在 5000 倍下对淀粉颗粒的形态特征进行观察和记录。

3.3.3 红外光谱分析

参照 Wang 等^[117]的方法并做适当修改, 将样品和 KBr 干燥至恒重状态后, 分别称取 4 mg 的样品和 300 mg 的 KBr, 并将其置于玛瑙研钵中。在红外灯的照射下, 将样品和 KBr 充分研磨均匀, 直至形成均匀的混合物。然后, 将研磨后的混合物压制成薄片, 并将该薄片置于傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 中进行扫描测定。傅立叶变换红外光谱仪的具体参数设定如下: 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4 cm⁻¹, 波长的扫描范围为 600 至 4000 cm⁻¹。

3.3.4 X-射线衍射分析

取 200 目的研磨样品送入样品架, 参考 Liu 等^[118]的方法并做相应修改, 使用 Cu-Kα 靶材, 配备石墨单色器和 Ni 滤波器, 设置加速电压为 40 kV, 电流为 30 mA。测量角度范围选择 $2\theta=5^\circ$ 至 40° , 步宽为 $2\theta=0.02^\circ$, 扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$ 进行测量, 并使用 MDI jade6 软件计算出相对结晶度。

3.3.5 直链淀粉的测定

采用北京索莱宝直链淀粉试剂盒测定。

3.3.6 凝胶质构特性分析

配制 15% 的淀粉溶液, 沸水浴 30 min, 搅拌至完全糊化, 冷却至室温, 参照 Yang 等^[119]的方法并做适当修改, 质构仪在 TPA 模式 (测试前后速度为 30 mm/min,

起始力为 3.0 N，形变 70%) 下测试，测定淀粉的硬度、胶粘性、弹性、咀嚼性。

3.3.7 溶解度与膨胀度的测定

参考刘云芬等^[120]的方法，分别称取芡实(改性)淀粉 1 g，质量为(m_0)，加入 10 mL 的蒸馏水溶解，转移到提前烘至恒重的离心管 (m_1) 中，在 95 °C 水浴 30 min，自然冷却到 25 °C，离心 10 min (3000 r/min)，倒出上清液于锥形瓶 (m_2) 中，在 110 °C 条件下烘至恒重(m_3)，并称量离心管和沉淀的重量 (m_4)。芡实淀粉溶解度及膨胀度分别按(3-1)、(3-2)式计算。

$$S = \frac{(m_3 - m_2)}{m_0} \times 100\% \quad (3-1)$$

$$B = \frac{m_4 - m_1}{m_0 \times (100 - S)} \times 100 \quad (3-2)$$

式中： S —溶解度，%； B —膨胀度，g/g； m_0 —芡实(改性)淀粉质量，g； m_1 —离心管恒重重量，g； m_2 —锥形瓶重量，g； m_3 —锥形瓶和上清液恒重重量，g； m_4 —离心管和沉淀重量，g。

3.3.8 析水率的测定

称取 1 g 样品并放入已经达到恒重 (m_0) 的离心管中，加入适量水配制成质量分数为 6% 的淀粉乳，记录总质量为 (m_1)。沸水浴中加热 25 min，然后冷却至 25 °C。随后，将离心管在 -20 °C 的环境中冷冻 24 小时。自然解冻后，以 5000 r/min 的速度离心 15 min，弃去上清液，称量离心管和沉淀的总重量，记录为 (m_2)。按(3-3)式计算析水率。

$$D = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (3-3)$$

式中： D —析水率，%， m_0 —离心管恒重重量，g； m_1 —淀粉乳和离心管重量，g； m_2 —沉淀和离心管重量，g。

3.3.9 持水率的测定

分别称取 1 g 样品，置于恒重 (m_0) 的 50 mL 的离心管中，加入 10 mL 的蒸馏水后置于漩涡混匀仪充分混匀，80 °C 水浴 30 min，自然冷却至 25 °C 后离心 (11000 r/min, 10 min)，弃去上清液，记沉淀和离心管的总质量为 (m_1)。按照 (3-4) 式计算持水率。

$$Q = \frac{m_1 - m_0 - 1}{1} \times 100\% \quad (3-4)$$

式中： Q —持水率，%； m_0 —离心管恒重重量，g； m_1 —沉淀和离心管重量，g。

3.3.10 快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉的测定

参照 Englyst 等^[121]的方法修改，称取 200 mg 的原淀粉和改性淀粉样品于离心管中，添加醋酸钠缓冲液（pH 值 5.2, 0.2 mol/L）15 mL，高温蒸煮 25 min 后冷却至室温，加入猪胰 α -淀粉酶（2900 U）和糖化酶（150 U）混合液 10 mL，在 37 °C 条件下保温水解，在水浴 0 min 时取 0.5 mL 样液沸水浴灭酶（10 min），20 min 时取 0.5 mL 样液沸水浴灭酶（10 min），120 min 时取 0.5 mL 样液沸水浴灭酶（10 min）。

葡萄糖、总淀粉含量均采用北京索莱宝淀粉试剂盒测定，总淀粉含量测定中取样量略有修改，为保证与消化淀粉测定前处理一致，故称取 0.2 g 淀粉样品。快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉分别按照式(3-5)(3-6)(3-7)计算。

$$RDS = (G20 - FG) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (3-5)$$

$$SDS = (G120 - G20) \times \frac{0.9}{TS} \times 100\% \quad (3-6)$$

$$RS = (1 - RDS - SDS) \times 100\% \quad (3-7)$$

式中： $G20$ 、 $G120$ —淀粉酶水解 20 min 和 120 min 后的葡萄糖含量（单位：mg）； FG —酶水解处理前淀粉中葡萄糖含量，mg； TS —样品中总淀粉含量，mg。

3.3.11 数据处理与分析

使用 Microsoft 365 Excel 记录数据、Origin 2022 进行绘图、使用 IBM SPSS Statistics 26 进行显著性差异分析、TBtools v2.096 进行聚类热图分析。

3.4 结果与分析

3.4.1 改性处理对芡实淀粉微观结构的影响

芡实原淀粉与改性淀粉的结构表征分析见图 3-1，经过不同改性技术处理的芡实改性淀粉颗粒的形貌发生显著的变化，原有颗粒结构被破坏，颗粒形貌粗糙，不规则，大小不一。由图 3-1（A）可知，电镜图中 YDF 表现为椭圆或者圆形颗

粒状，表面完整无粘连。图 3-1 (B) WY 改性淀粉则呈海绵状，淀粉颗粒相互粘连无独立完整性。其变化原因可能是淀粉经过微波一压热处理后，由于受热以及吸水导致晶体发生裂解后使直链淀粉发生重排，从而淀粉颗粒形态发生改变。淀粉经过高压糊化处理后，微波处理进一步促进了淀粉颗粒的破碎，使淀粉中的直链淀粉和支链淀粉解离，形成海绵状结构，导致回生淀粉内部区域形成双螺旋^[122]。图 3-1 (C) CM 改性淀粉依旧表现为椭圆或者圆形颗粒状，表面光滑完整。图 3-1 (D、E) 微波压热-超声酶解增强改性淀粉表现出不同的形貌，淀粉浓度、干燥方式、处理步骤不同对其形态产生了差异，其中 WYA 的结构相较于 CMA 更显完整，因为真空冷冻干燥的淀粉更显疏松多孔，而鼓风干燥容易使淀粉表面硬化^[123]。微波压热超声酶解复合相比于微波压热其致密结构更加明显，表面无明显颗粒状而呈现出层次结构。在杨玥熹等^[124]采用酶-压热法改性中发现芡实淀粉颗粒表面粗糙，均呈现蜂窝状，酶处理使得淀粉分子片段减小，增大酶与淀粉分子的接触面积。其次由于加入超声处理后，超声波破坏氢键，断裂淀粉链并降低淀粉的分子量，更显著地促进了淀粉酶解程度^[125]。随着淀粉乳浓度的增加，过高浓度的芡实淀粉乳液难以混匀和分散影响分子重排列和结晶，可能导致反应不完全^[126]。

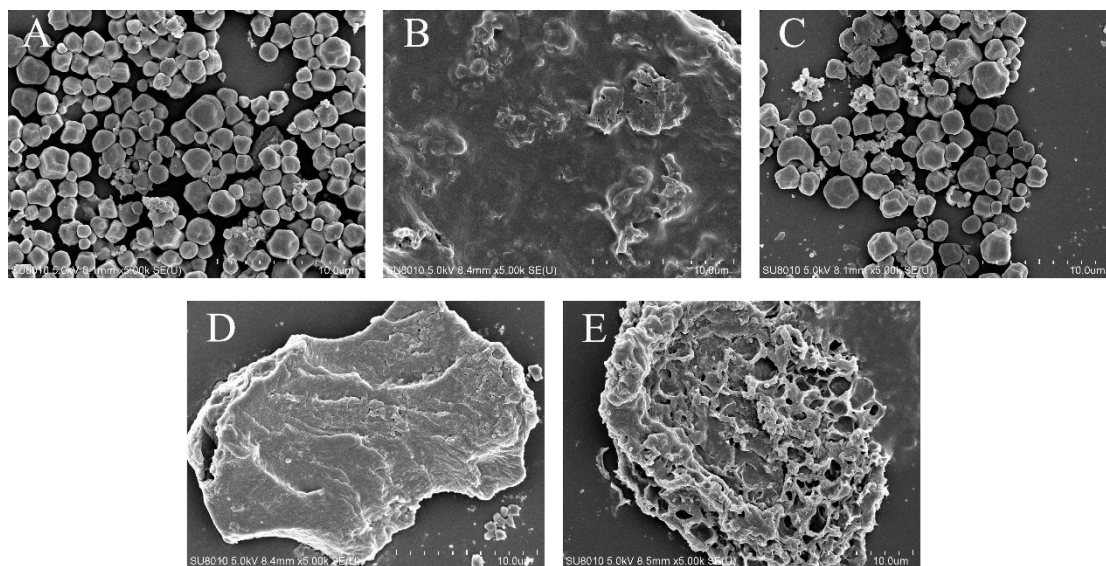


图 3-1 YDF (A)、WY (B)、CM (C)、WYA (D)、CMA (E) 扫描电镜图

Fig. 3-1 Scanning electron microscope images of YDF (A), WY (B), CM (C), WYA (D), and CMA (E)

3.4.2 改性处理对芡实淀粉红外光谱的影响

由图 3-2 红外光谱的结果显示，芡实淀粉与芡实改性淀粉特征吸收峰的位置基本没有发生变化，说明没有产生或者丢失化学键和官能团，但是吸收强度在

1000-1700 cm^{-1} 及 3000-3700 cm^{-1} 有明显差异, 代表了不同官能团或化学键在淀粉中的相对含量或存在程度有差异。红外光谱可以观察淀粉的短程有序结构, 吸收峰在 1022 cm^{-1} (R1022) 和 1047 cm^{-1} (R1047) 反映了非晶结构和结晶区域, 峰的强度之比可用来描述短程结构的有序性^[127], 1022 cm^{-1} 与 995 cm^{-1} 处峰强度的比值反映了淀粉分子的双螺旋结构程度(R1022/995)。其中 WYA 处理的芡实淀粉分子 R1047/1022 值最大, 说明 WYA 改性淀粉的短程有序性更高^[128], R1022/995 的值最小, 说明双螺旋程度最低。由表 3-3 知, 改性淀粉的 R1047/1022 值全部高于 YDF, R1022/995 值整体低于 YDF, 说明改性淀粉短程有序性增高, 淀粉分子的双螺旋程度变低。淀粉增强处理后的 WYA 比 WY 短程有序性高, 双螺旋程度低; 同样 CMA 比 CM 短程有序性高, 双螺旋程度低。在 3383 cm^{-1} 附近的宽峰是淀粉分子间氢键 O-H 的伸缩振动带, 2931 cm^{-1} 附近的峰是 C-H 的伸缩振动特征峰, 淀粉吸收峰的强度发生变化, 表明对应的化学键引起的振动强度发生变化^[129]。超声处理后无定形区和支链淀粉分子链被破坏形成的短链分子链通过氢键形成新的有序结构, 微波处理会影响淀粉的短程有序性^[130], 增强芡实淀粉分子短程有序结构, 两者相比微波的作用要高于超声, 超声可能存在使双螺旋结构松动导致断链^[131]。

表 3-3 芡实原淀粉和改性淀粉的 R1047/1022 和 R1022/995 比值

Table 3-3 Ratios of R1047/1022 and R1022/995 of native and modified Euryale Ferox

标志	YDF	WY	CM	WYA	CMA
R1047/1022	0.791	0.948	0.795	0.957	0.881
R1022/995	1.541	1.017	1.595	0.986	1.139

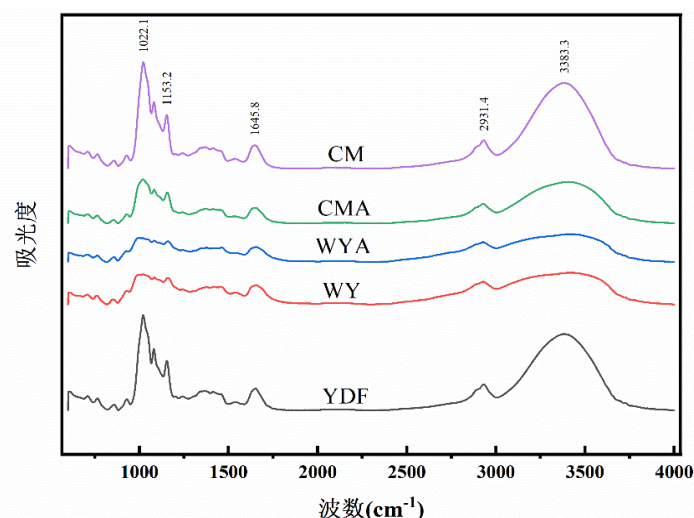


图 3-2 原淀粉及改性淀粉的红外光谱分析图

Fig. 3-2 Infrared spectrum analysis of native starch and modified starch

3.4.3 改性处理对芡实淀粉 X-射线衍射图谱的影响

淀粉的晶体类型可以分为 A、B、C 和 V 型，其中 A 型淀粉在 $2\theta = 15^\circ$ 、 17° 、 18° 和 23° 处有清晰的衍射峰；B 型淀粉在 $2\theta = 5.5^\circ$ 、 17° 、 22° 和 24° 处有清晰的衍射峰^[132]；C 型淀粉包含 A 型和 B 型。如图 3-3，YDF 在衍射角为 15.27° 、 17.29° 、 18.16° 、 23.18° 出现衍射峰，为 A 型淀粉，相对结晶度为 43.46%，表明结晶区内的双螺旋间相互作用较强；CM 在衍射角 15.26° 、 17.25° 、 18.07° 、 23.21° 出现衍射峰，仍有大部分芡实淀粉保留原有晶型；WYA 在 15.30° 、 17.26° 、 18.08° 、 23.17° 出现衍射峰，在 17.26° 、 22.54° 、 24.19° 也出现衍射峰，衍射峰分布相对分散为 C 型淀粉。表明芡实淀粉在微波压热后，又经过超声酶解处理后结晶结构破坏，结晶类型由 A 型转变为 B 型，增强了抗酶解性能。CMA 衍射峰分布也较为分散，可能为 C 型淀粉。WY 没有明显衍射峰，结晶度较低，偏向于无定形态。CMA 与 CM 比较发现，结晶度降低，且有新的晶型产生；而 WYA 与 WY 相比发现，结晶度增大。其中最大的因素与淀粉压热处理有关，由于高温下氢键的破坏，导致结晶区被破坏、熔化，因此过热处理降低了相对结晶度^[133]。

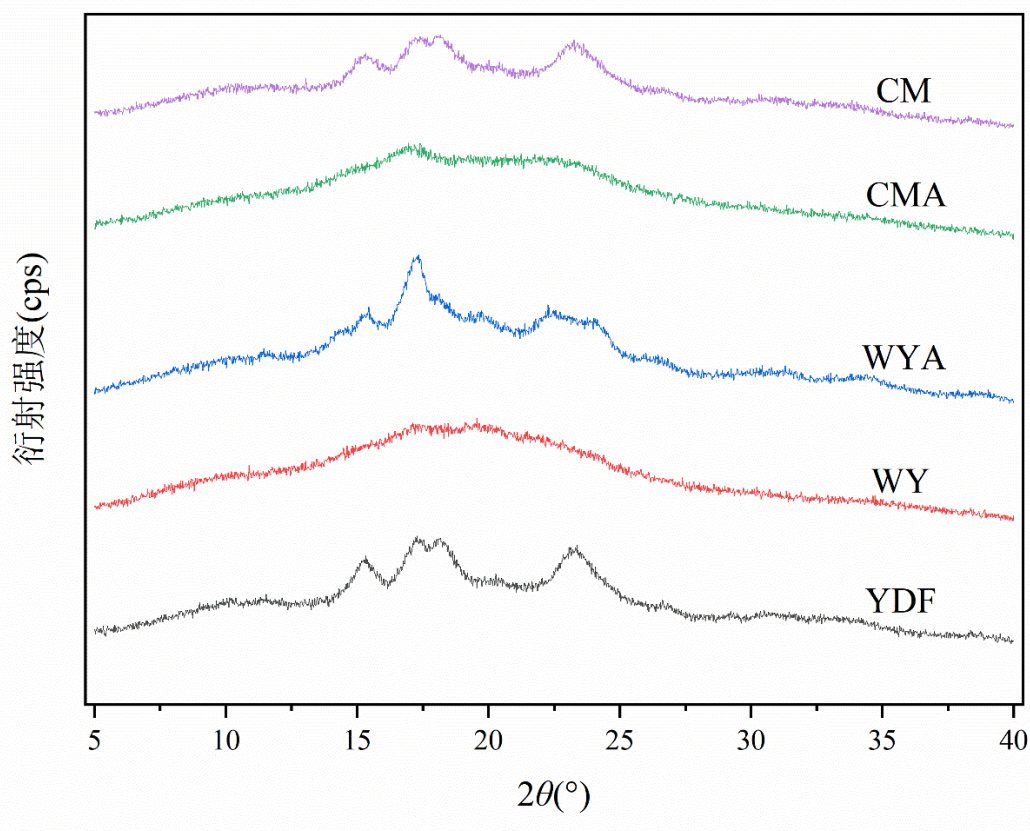
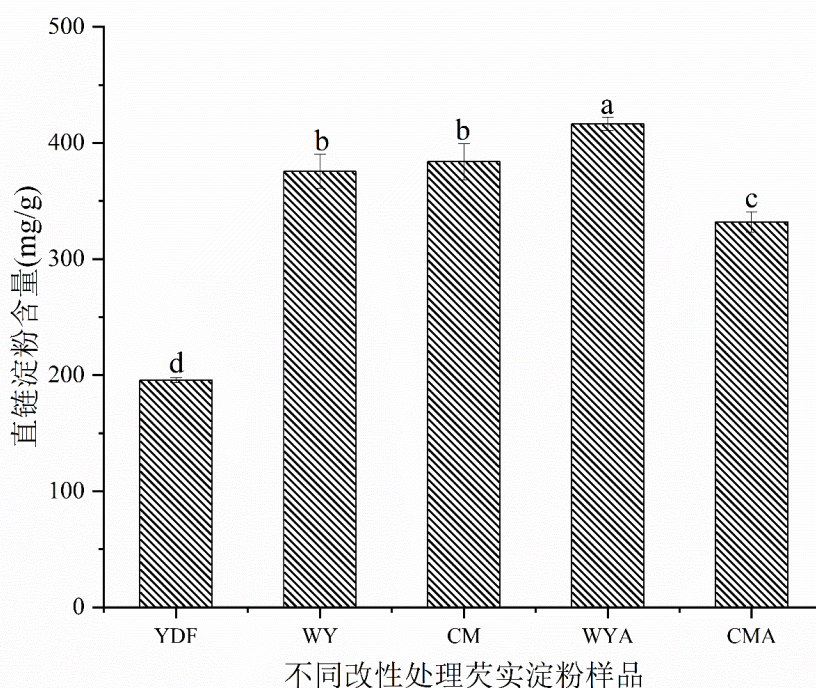


图 3-3 芡实淀粉及其改性淀粉 X 射线衍射图谱

Fig. 3-3 X-ray diffraction patterns of Euryale ferox starch and its modified starch

3.4.4 改性处理对芡实淀粉中直链淀粉含量的影响

抗性淀粉的得率与原料中的直链淀粉含量有密切的关系，改性处理伴随着直链淀粉含量的增加。比较不同改性淀粉与原淀粉中直链淀粉含量的差异，由图 3-4 可知，改性淀粉的直链淀粉含量相较于原淀粉整体呈上升趋势，CMA、WY、CM、WYA 的直链淀粉含量依次增大，分别是 YDF 组的 1.69 倍、1.92 倍、1.96 倍、2.13 倍，其中 WYA 组直链淀粉含量最高。WYA 与 WY 相比，直链淀粉含量升高，CMA 与 CM 相比，直链淀粉含量降低。其变化规律与 3.4.3 中的结晶度相同。微波压热处理后淀粉分子重新排列，使得淀粉的结晶结构形成更加稳定，超声酶解处理降低支链淀粉的比例，增加了直链淀粉的相对含量。YANG 等^[134]通过压热法、压热酶解复合以及双酶法对芡实淀粉进行改性，直链淀粉含量增幅最大的是压热酶解（19.93%），其含量和增幅均低于本研究的 WYA 组。



注：图中小写字母不同表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

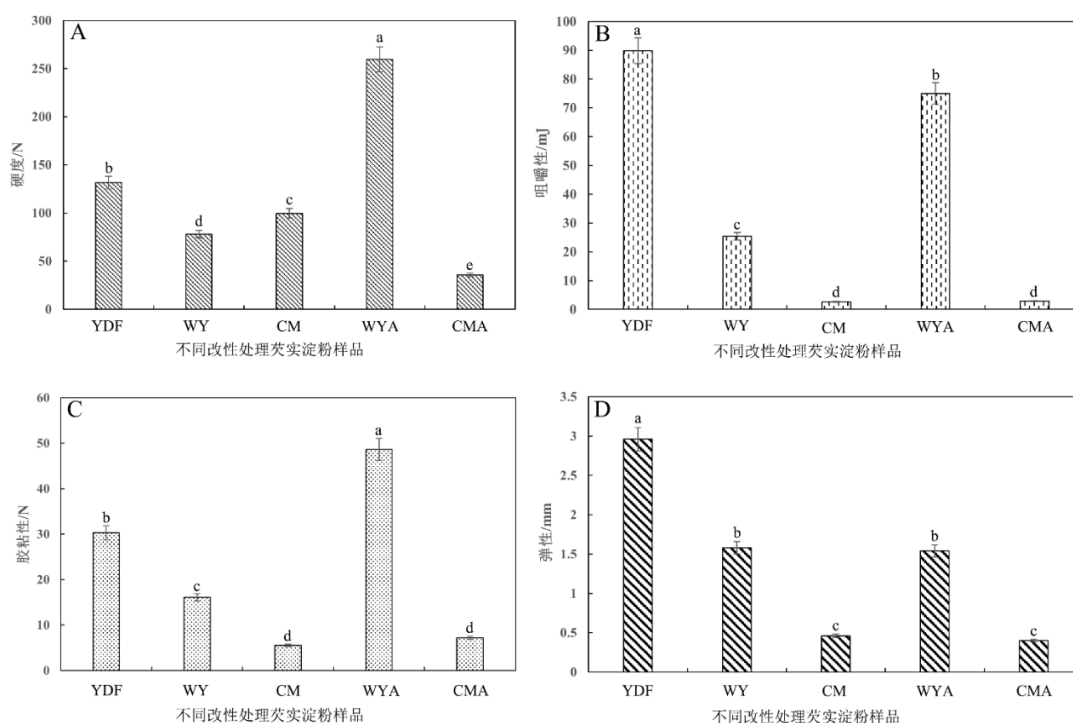
图 3-4 原淀粉及改性淀粉的直链淀粉含量

Fig. 3-4 Amylose content of native starch and modified starch

3.4.5 改性处理对芡实淀粉质构特性的影响

硬度是反映样品口感的重要指标，胶粘性描述淀粉的黏性特性，是硬度和内聚性的乘积，咀嚼性是胶粘性跟弹性的乘积。如图 3-5 所示，相较于原淀粉，芡

实改性淀粉的硬度、咀嚼性、胶黏性、弹性均呈下降趋势，刘燕^[135]等在山药淀粉改性后发现其弹性、胶黏性与咀嚼性也存在不同程度的降低。直链淀粉在改性过程中发生结晶重排，从而影响凝胶特性，导致弹性下降^[136]。WYA 组除外，硬度和胶黏性分别高出原淀粉 97.57%和 60.53%。硬度与直链淀粉的含量成正相关^[137]，WYA 的直链淀粉在改性处理后含量最高，因此硬度呈现出较高水平。在硬度、咀嚼性、胶黏性方面，WYA 组分别高出 WY 组 2.33 倍、1.95 倍、2.02 倍；CMA 组是 CM 组的 0.36 倍、1.13 倍、1.30 倍，弹性无显著性差异。WYA 组和 CMA 组相比，其硬度、咀嚼性、胶黏性、弹性分别高出 6.25 倍、24.9 倍、5.74 倍、2.84 倍。可见，不同物理方法改性处理次序对淀粉得质构特性具有极大得影响。



注：图中小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3-5 原淀粉及改性淀粉的硬度(A)、咀嚼性(B)、胶黏性(C)、弹性(D)

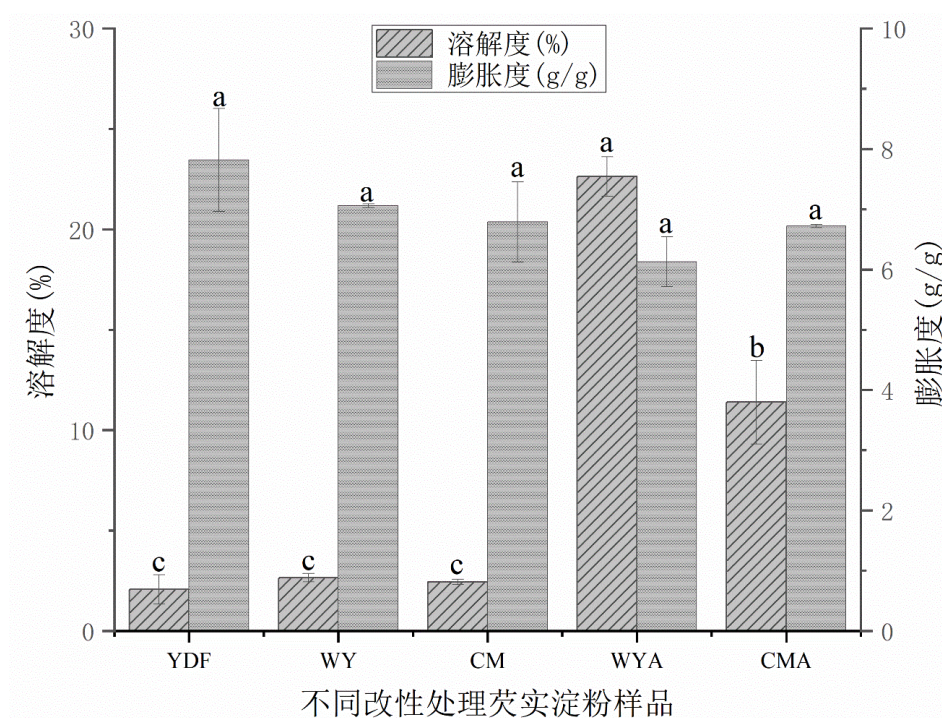
Fig. 3-5 Hardness (A), chewiness (B), stickiness (C), and elasticity (D) of native starch and modified starch

3.4.6 改性处理对芡实淀粉溶解度、膨胀度的影响

溶解度与膨胀度是淀粉的重要基础应用性质，淀粉的溶解度是淀粉颗粒吸水膨胀、结构瓦解并分散到水中的程度。如图 3-6 所示增强改性的淀粉样品 WYA、CMA 溶解度较原淀粉和单一改性淀粉 WY、CM 高。YDF、WY 及 CM 的溶解度无显著差异。微波预处理可破坏淀粉内部结构，有利于淀粉分子溶解，超声处

理使分子有序结构被破坏和游离羟基的短链含量增加,从而水分子与游离羟基结合使溶解度增大^[138]。同时糖苷键断裂引起的分子极性增加和链间氢键的减少也是导致溶解度增加的原因。微波和超声作为增强改性的预处理,可明显增加其效应, WYA 组的溶解度最高,比 YDF 高出 9.98 倍。

淀粉膨胀度是指淀粉颗粒在过量水中加热糊化后,体积膨胀的程度。膨胀度也可以侧面评估淀粉颗粒中无定形区和晶体区之间相互作用力的程度大小,直链淀粉和支链淀粉的含量和特征会影响其大小^[139]。各类淀粉的膨胀度无显著差异。



注: 图中小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

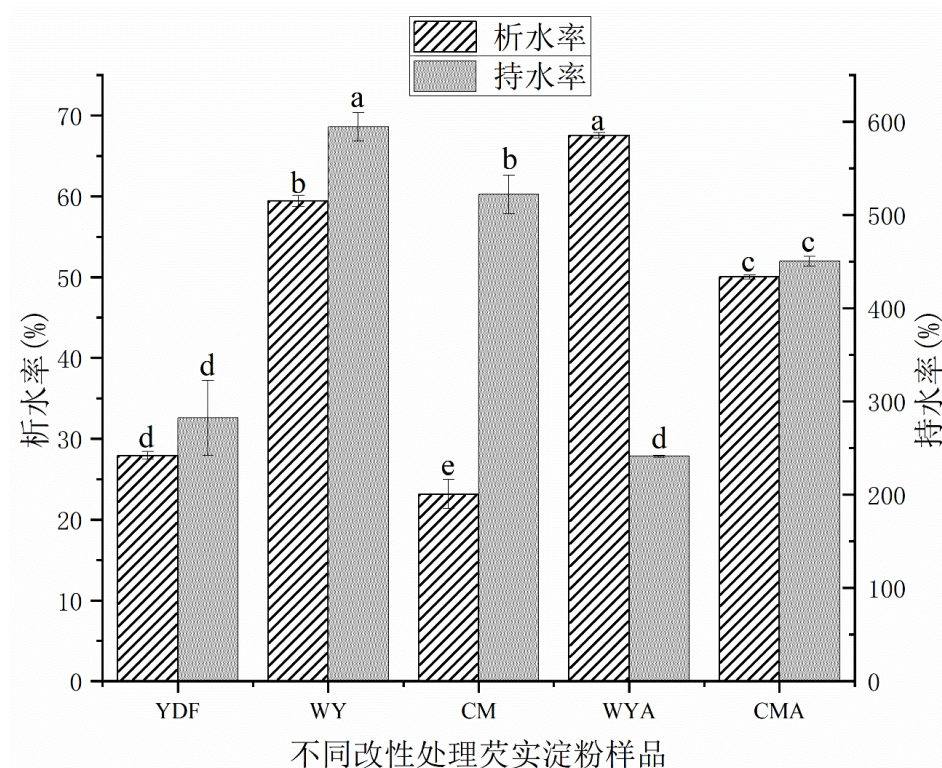
图 3-6 淀粉及改性淀粉的溶解度、膨胀度

Fig. 3-6 Solubility and swelling of starch and modified starch

3.4.7 改性处理对芡实淀粉析水性、持水性的影响

淀粉的析水性和持水性两个属性在食品工业的应用中非常重要,影响的是食品的质地、口感以及保质期。析水性是评判冻融稳定性的指标,析水性越小,说明淀粉糊的冻融稳定性越好,在冻融循环中保持其结构完整性和功能性质越好。持水性反映淀粉样品与水结合,并保留水的能力。持水性与淀粉样品的颗粒形态、内部结构和直链淀粉含量等有关。由图 3-7 可知,较 YDF, CM 的析水性下降 17.2%,持水性上升 84.9%,表现较强的冻融稳定性和持水性,因其网状结构,能够形成稳定的凝胶网络,可有效束缚水分。WY、WYA、CMA 均增大了析水率,可能原因在于微波压热作用易形成空腔或者孔隙,在改变淀粉颗粒结构的同

时,也可能减弱了淀粉颗粒的无定型区域和淀粉颗粒之间的结合力,使得水分更难被吸附和保持在结构中,容易析出。此外,Zhang 等^[140]认为直链淀粉含量与冻融稳定性呈负相关,直链淀粉含量高的淀粉更容易在冷冻时形成晶体,导致结构破坏和析水,这也解释了 WYA 析水率较高的原因。改性淀粉的持水率较 YDF 升高,WY、CM 的持水性分别显著 ($P<0.05$) 高于 WYA、CMA。表明增强改性反而不利于淀粉保留水分。



注: 图中小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 3-7 原淀粉及改性淀粉的析水率、持水率

Fig. 3-7 Water separation rate and water holding rate of native starch and modified starch

3.4.8 改性处理对芡实淀粉消化性的影响

改性淀粉的快消化淀粉(RDS)含量相较于 YDF 整体呈下降趋势, WY 的 RDS 比 WYA 的高 31.66%, CMA 的 RDS 比 CM 高 9.46%。改性淀粉的慢消化淀粉(SDS)含量相较于 YDF 整体趋势比较平稳, WYA 的 SDS 比 WY 的高 4.70%, CMA 的 SDS 比 CM 高 11.83%; 改性淀粉的抗性淀粉(RS)含量相较于 YDF 整体呈上升趋势, WYA>CM>WY> CMA>YDF。

结晶度、有序结构、粘度、溶解和溶胀度等多种因素影响淀粉样品的消化速率。RDS 含量较高时容易快速升高血糖, RS 和 SDS 被缓慢消化而不会使血糖短时间内快速升高。RS 主要存在于淀粉颗粒的结晶区, 特别是高度有序的双螺旋

结构区域。这些区域的淀粉分子排列非常紧密，形成高度有序的结晶结构，酶分子难以进入并与之结合，因此抗酶解能力很强；SDS 主要存在于淀粉颗粒中结晶区和非结晶区之间的过渡区域。这些区域的结构介于结晶区和非结晶区之间，淀粉分子排列相对有序，但不如结晶区紧密。RDS 主要存在于淀粉颗粒的非结晶区（无定形区）。这些区域的结构较为松散，淀粉分子排列无序，容易被酶接触和水解，因此消化速度很快^[141]。改性淀粉的 RDS 均低于原淀粉，芡实淀粉经过改性处理后可以降低 RDS 含量，RS 含量均高于原淀粉，符合预期改性处理增强淀粉抗性，表明微波压热及超声酶解处理可以实现对淀粉消化特性的调控。此外，WYA 组在体外消化特性方面优势相对明显。

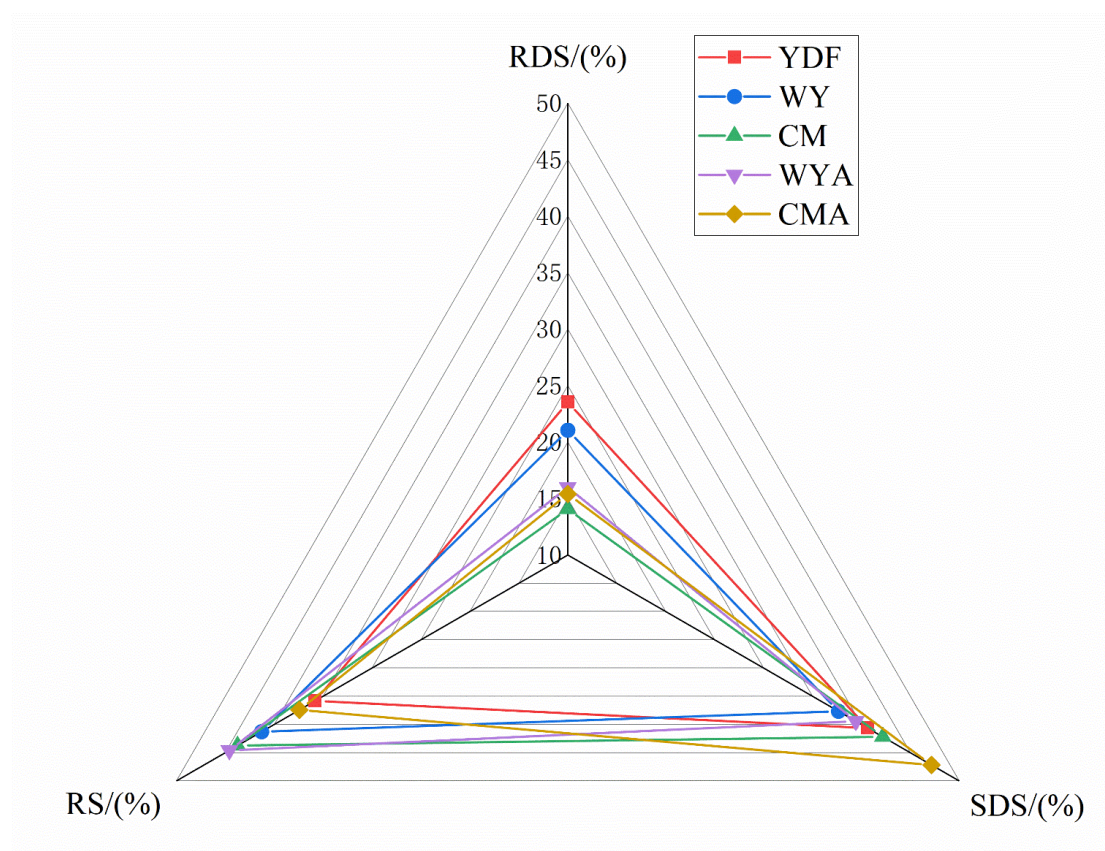


图 3-8 快消化淀粉、慢消化淀粉、抗消化淀粉分析

Fig. 3-8 Analysis of fast-digestible starch, slow-digestible starch, and resistant-digestible starch

3.4.9 芡实原淀粉与改性淀粉的理化特性的聚类热图分析

热图作为可视化手段，能够直观地显示原淀粉与四组改性淀粉中各种理化变量的变化。如图 3-9 所示，每一行表示不同的变量，每一列表示不同处理的样品。颜色越蓝，样品中的目标变量数值越高；颜色越浅则反之。WYA 改性淀粉的质地（咀嚼性、硬度、胶黏性）、溶解度以及抗性淀粉含量等较高，而膨胀度、弹性与快消化淀粉在原淀粉中较高。上述结果表明，微波压热联合超声酶解改性处

理较微波压热技术和超声酶解技术在淀粉的理化特性均有不同程度的提高,其中 WYA 组适宜作为芡实淀粉的改性条件。相关性分析显示芡实淀粉的咀嚼性与弹性及胶粘性呈正相关等, RS 与直链淀粉呈正相关。

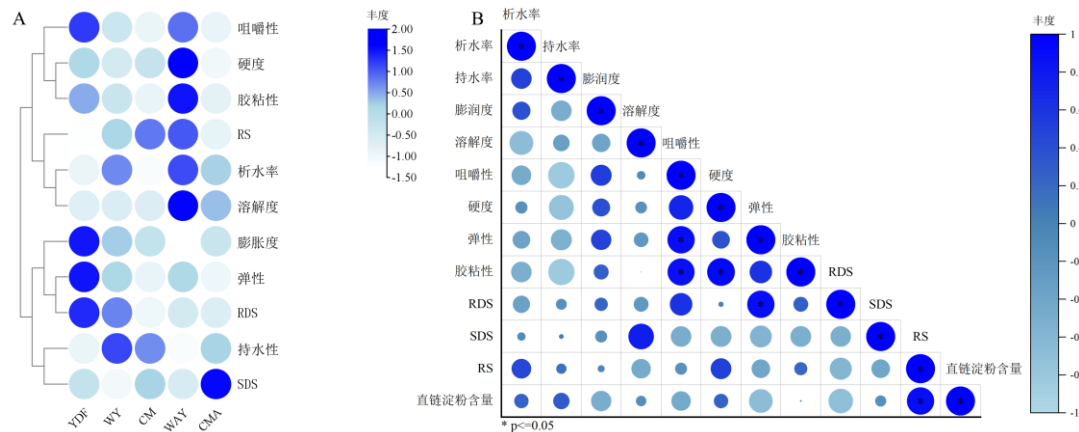


图 3-9 芡实淀粉及其改性淀粉理化特性热图 (A) 及相关性分析图 (B)

Fig. 3-9 Heat map of physicochemical properties of Euryale Ferox starch and its modified starch (A) and correlation analysis diagram (B)

3.5 本章小结

本章利用物理和生物处理技术的结合,通过微波压热与超声酶解处理芡实淀粉,针对淀粉结构、理化特征及体外消化特性进行评价和分析。不同改性淀粉外观形态特征和结构差异明显,改性后的淀粉没有新的化学键和官能团的形成或丢失,咀嚼性、弹性、膨胀度降低,溶解度、持水率普遍升高。改性淀粉 RDS 含量较 YDF 降低,直链淀粉和 RS 含量增高。

微波压热联合超声酶解改性处理 (WYA) 较微波压热(WY)的淀粉结构特征更加明显,致密和刚性结构更加凸显,短程有序性增加,质地、抗性淀粉含量和溶解度提高;微波压热联合超声酶解改性处理 (CMA) 较超声酶解(CM)在慢速消化淀粉含量显著提高。和 CMA 相比,在结构特征和理化特性的表现, WYA 更适宜作为低 GI 芡实淀粉的改性条件,为芡实淀粉精深加工提供了理论依据和数据支持。

第4章 低GI芡实麦棒复配及营养代餐粉的复配工艺研究

4.1 前言

麦棒是一种旨在快速补充能量及营养的便携式食品,适合需要迅速恢复体力的人群。它通过均衡的配方提供蛋白质、脂肪和碳水化合物,满足人体对能量的即时需求^[142]。现代能量棒注重天然健康,通常避免使用人工色素、香精及防腐剂,成为理想的膳食替代品。以坚果能量棒为例,它不仅能够缓解焦虑、提升情绪,还有助于增强记忆力,是健康生活的优选零食。随着全球生活方式的改变,膳食结构失衡和体力活动减少导致营养问题日益突出,肥胖及相关慢性疾病如高血压、糖尿病、脂肪肝和冠心病的发病率不断攀升^[143]。在此背景下,能量棒因其便捷性和营养价值,逐渐成为发达国家和发展中国家健康意识增强人群的重要选择。

代餐粉是一种经过科学配比的营养补充品,常由谷类、豆类、薯类等为主以粉末形式呈现,旨在替代传统正餐并提供全面的营养支持^[144]。它通常包含蛋白质、碳水化合物、脂肪、膳食纤维、维生素和矿物质等成分,能够满足人体日常能量需求的同时帮助控制热量摄入。代餐粉的主要优势在于其便捷性,只需与水、牛奶或其他液体混合即可快速食用,非常适合生活节奏快、时间紧张的人群。此外,代餐粉口味丰富,可以加入巧克力、香草、草莓等,能够满足不同消费者的喜好。它常用于体重管理、健身增肌或特殊饮食需求的场景,帮助用户实现健康目标。随着人们对健康生活方式的重视,代餐粉逐渐成为现代饮食中的重要选择之一。

正交实验与响应面实验皆为优化实验条件的统计学方法。正交实验在单因素实验的基础上高效筛选显著因素,确定初步优化方案;响应面实验则在单因素实验的基础上精细建模,寻找最优参数组合。两者都旨在通过精心设计的少量实验,高效地优化多因素实验,并找到最佳的参数组合。

4.2 材料与仪器

4.2.1 材料与试剂

色拉油、麦芽糖醇、盐、全蛋液、黑芝麻、全麦粉、低筋粉、燕麦预拌粉、菊粉、白芸豆粉、魔芋粉 市售;芡实粉、藜麦粉 苏州市农业科学院提供。

表 4-1 实验试剂

Table 4-1 Experimental reagents

试剂/材料	级别	厂家
柠檬酸	AR	中国上海试剂总厂
乙酸钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
氢氧化钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
冰乙酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
无水葡萄糖	AR	上海沪试实验室器材股份有限公司
3,5-二硝基水杨酸	AR	上海麦克林生化科技有限公司
无水乙醇	AR	南京化学试剂有限公司
酒石酸钾钠	AR	国药集团化学试剂有限公司

4.2.2 仪器与设备

表 4-2 实验仪器

Table 4-2 Experimental instruments

仪器	型号	厂家
热风炉	SM-705EE	新麦机械（无锡）有限公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9055	上海一恒科学仪器有限公司
紫外可见分光光度计	TU1900	北京普析通用仪器有限责任公司
高压电场低温等离子体冷杀菌实验系统	CPS-I	南京屹润等离子科技有限公司

4.3 实验方法

4.3.1 芡实麦棒制备工艺

原料混合（色拉油、麦芽糖醇、盐、全蛋液、水、黑芝麻、全麦粉、低筋粉、燕麦预拌粉、菊粉、芡实粉）-搅拌均匀-挤压成片状-切条-摆盘烘干（热风炉，140 ℃，28 min）-包装。

4.3.2 芡实麦棒基础配方

根据前期预实验，固定色拉油 24 g、麦芽糖醇 12 g、盐 1.7 g、全蛋液 25 g、水 30 g、黑芝麻 3.75 g、菊粉 7.5 g。

4.3.3 芡实麦棒配方优化

参考基本配方，分别分析芡实添加量（5 g、10 g、15 g、20 g、25 g）、全麦粉添加量（45 g、50 g、55 g、60 g、65 g）、低筋粉添加量（45 g、50 g、55 g、60 g、65 g）、燕麦预拌粉添加量（9 g、12 g、15 g、18 g、21 g）对芡实麦棒品质

的影响。

4.3.4 感官评价标准

参考文献，制定感官评分表，对芡实麦棒进行感官评价。见表 4-3

表 4-3 芡实麦棒品质评价标准

Table 4-3 Euryale Ferox granola bar quality evaluation criteria

项目	评价标准	得分/分
色泽	色泽均匀，整体呈现浅褐色.没有焦糊现象出现	21~25
	色泽相对均匀，整体颜色较浅或较深，略有焦糊现象出现	11~20
	表面无光泽，颜色不均匀，有明显焦糊现象	0~10
风味	有较浓郁香味，有浓郁的芡实香气，无异味、涩味、苦味等不良风味	21~25
	有淡淡营养麦棒香味，略有芡实香味，略微有异味、涩味、苦味等不良风味	11~20
	无芡实香味，有明显异味、涩味、苦味等不良风味	0~10
口感	口感细腻，不油腻且清爽，甜度适宜，软硬适中，无粘牙或磕牙现象出现	21~25
	口感较细腻，略微油腻或较干，略显粗糙，咸、甜度较适宜，软硬较适中，略微有粘牙或磕牙现象出现	11~20
	口感较差，油腻或干脆粗糙，偏咸甜或不咸甜，较软或较硬，有严重的粘牙或磕牙现象出现	0~10
组织	外形完整，无裂缝、破损、塌陷或掉渣现象，切面孔洞细密均匀	21~25
形态	外形较完整，存在小裂缝、有部分破损、塌陷或掉渣现象出现，切面孔洞较不均匀	11~20
	外形松脆易碎不完整，有明显裂缝、破损、塌陷或掉渣现象出现，切面孔洞不均匀，且存在较大孔洞	0~10

4.3.5 芡实代餐粉制备工艺

参考 Ge^[145]等的低温等离子体方法，根据预实验对芡实粉进行低温等离子体处理（处理时间为 5 min，处理电压为 120 kV），然后参考 Shen^[146]等人的方法制备柠檬酸酯化淀粉，按照质量比 5:2 称芡实粉和柠檬酸，加入适量的蒸馏水，混合均匀。用 10 mol/L 的 NaOH 调节 pH 至 3.5，在室温下静置 12 h 后，在 50 ℃ 烘干 12 h。取出已干燥的样品，置于 150 ℃ 酯化 3 h，用无水乙醇洗涤 3 次，在 30 ℃ 下烘干，研磨成细粉。然后按照特定比例与白芸豆粉、藜麦粉、魔芋粉加水混合搅拌，50 ℃ 烘干至恒重，粉碎过 100 目筛，装袋保存。

4.3.6 芡实代餐粉单因素实验

设定芡实粉添加量 15、20、25、30、35 g；其他条件设定为白芸豆粉、藜麦粉和魔芋粉添加量的固定值分别为 30、40、45 g，进行体外消化测定，研究芡实粉添加量对代餐粉消化特性的影响。

设定白芸豆粉添加量 20、25、30、35、40 g；其他条件设定为芡实粉、藜麦粉和魔芋粉添加量的固定值分别为 25、40、5 g，进行体外消化测定，研究白芸豆粉添加量对代餐粉消化特性的影响。

设定藜麦粉添加量 30、35、40、45、50 g；其他条件设定为芡实粉、白芸豆粉和魔芋粉添加量的固定值分别为 25、30、5 g，进行体外消化测定，研究藜麦粉添加量对代餐粉消化特性的影响。

设定魔芋粉添加量 3、4、5、6、7 g；其他条件设定为芡实粉、藜麦粉、白芸豆粉添加量的固定值分别为 25、40、30 g，进行体外消化测定，研究魔芋粉添加量对代餐粉消化特性的影响。

4.3.7 代餐粉水解率测定

根据 Englyst 等的方法测定体外消化性。称取 200 mg 样品于 50 mL 离心管中，分别加入 10 mL pH 5.2 的 0.1 mol/L 醋酸钠缓冲液，振荡均匀，迅速加入 10 mL α -淀粉酶(290 U/mL)和糖化酶(15 U/mL)的混合溶液，置于 37℃ 恒温水浴锅中。分别取水解 20、30、60、90、120、180 min 的酶解液 1 mL，快速加入 4 mL 95% 乙醇溶液灭酶，离心，得上清液。取上清液 1 mL，测定葡萄糖含量，以时间为横坐标、淀粉水解率为纵坐标绘制体外消化水解率曲线图，对水解曲线与时间进行积分，得水解率积分值。

$$\text{淀粉水解率} = \frac{\text{取样点消化液中葡萄糖当量} \times 0.9}{\text{取样量}} \times 100\% \quad (4-1)$$

4.4 结果与分析

4.4.1 芡实粉添加量对芡实麦棒品质的影响

如图 4-1，芡实麦棒的品质随着芡实添加量的增大呈现出先升高后降低的趋势，当芡实添加量较少时，芡实麦棒中难以嗅到芡实的清香味，影响芡实原料的风味。虽然随着芡实量的增加可以展现芡实的风味，但是如果芡实添加太多，颜色变为偏灰色，这是因为芡实粉中的植物多酚类物质易氧化褐变，导致麦棒颜色

变暗^[147],从而失去了小麦的亮褐色,因此影响观感。因此复配芡实粉添加量 15-25 g 为最宜。

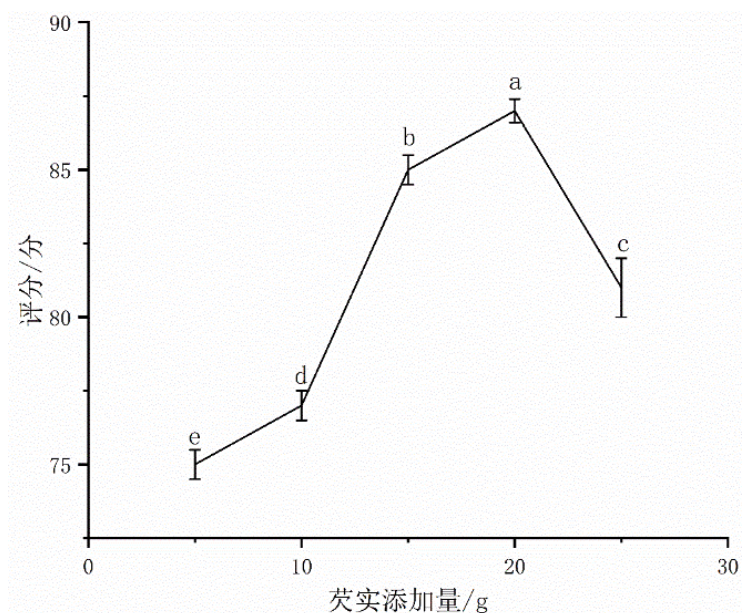


图 4-1 芡实粉添加量对芡实麦棒品质的影响

Fig. 4-1 Effect of the amount of Euryale Ferox powder added on the quality of Euryale Ferox cereal bars

4.4.2 全麦粉添加量对芡实麦棒品质的影响

全麦粉是一种营养丰富的全麦面粉,保留了小麦的麸皮和胚芽,富含膳食纤维、维生素和矿物质,具有低 GI 值和高饱腹感的特点。它的口感较粗糙,颜色偏深,适合制作全麦面包、饼干等健康食品。如图 4-2,当添加全麦粉的量较少时,芡实麦棒的麦香味不足,并且麦棒颜色偏淡,影响观感。当全麦粉的添加量过多,麦棒的麦褐色较深,并且麦香味比较浓,影响芡实的香味,麦棒不易成型,口感粗糙。麦棒呈现深棕色,表面发暗失去光泽,口感发硬、弹性较差。姜丰^[148]等研究者制作的麦麸面条的也是随着全麦的添加量增多,面条颜色变深且无光泽且蒸煮损失率增高。因此复配全麦粉添加量 50-60 g 为最佳。

4.4.3 低筋粉添加量对芡实麦棒品质的影响

低筋粉是一种蛋白质含量低(通常在 8.5%以下)、筋度弱的小麦面粉,适合制作口感松软或酥脆的糕点,如蛋糕、饼干、派皮等。它的颜色较白,吸水性较低,成品细腻柔软或酥脆易碎。如图 4-3,麦棒品质随着低筋粉添加量的增加呈现出先增大后减少的趋势。当添加的低筋粉比较少的话,麦棒不易成型,烘烤过程发生了变形。添加低筋粉的量比较大时,麦棒较硬。周育媛等优化曲奇饼干配

方时，也发现低筋粉添加的量比较多也会使饼干变硬^[149]。因此复配低筋粉添加量 50-60 g 为最佳。

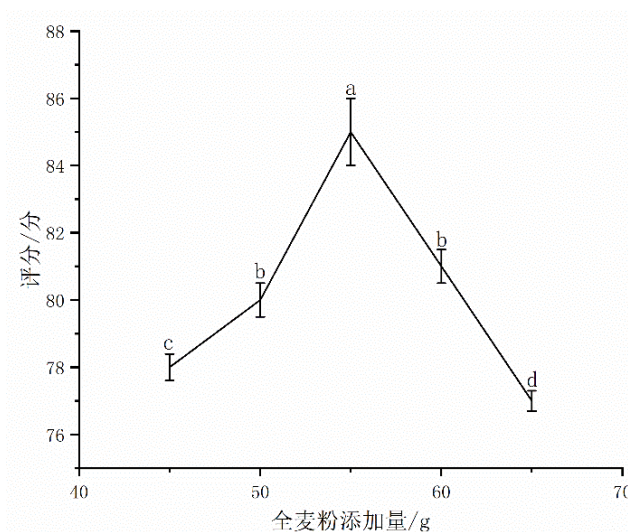


图 4-2 全麦粉添加量对芡实麦棒品质的影响

Fig. 4-2 Effect of the amount of whole wheat flour No. 6 added on the quality of Euryale Ferox cereal bars

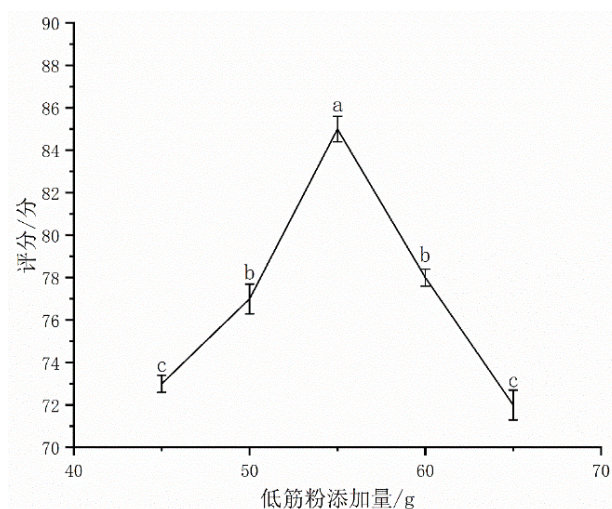


图 4-3 低筋粉添加量对芡实麦棒品质的影响

Fig. 4-3 Effect of low-gluten flour addition on the quality of Euryale Ferox cereal bars

4.4.4 燕麦预拌粉添加量对芡实麦棒品质的影响

燕麦预拌粉是一种以燕麦为主要成分的混合粉，富含膳食纤维、蛋白质、维生素和矿物质，具有低 GI 值和独特的麦香味，适合制作燕麦饼干、面包、松饼等健康食品。它口感柔软略带嚼劲，质地较密，能促进饱腹感和心血管健康，是注重营养和健康人群的理想选择。如图 4-4，麦棒品质随着燕麦预拌粉的添加量

增加而先增大后降低，因为添加燕麦预拌粉使麦棒有麦香味且口感酥脆，但是过多的添加燕麦预拌粉不能使麦棒成型，且会导致麦棒产生残缺及孔洞。燕麦预拌粉添加过多表面裂缝程度明显加重与吕培楷^[150]的结论相同。因此复配燕麦预拌粉添加量 9-15 g 为最佳。

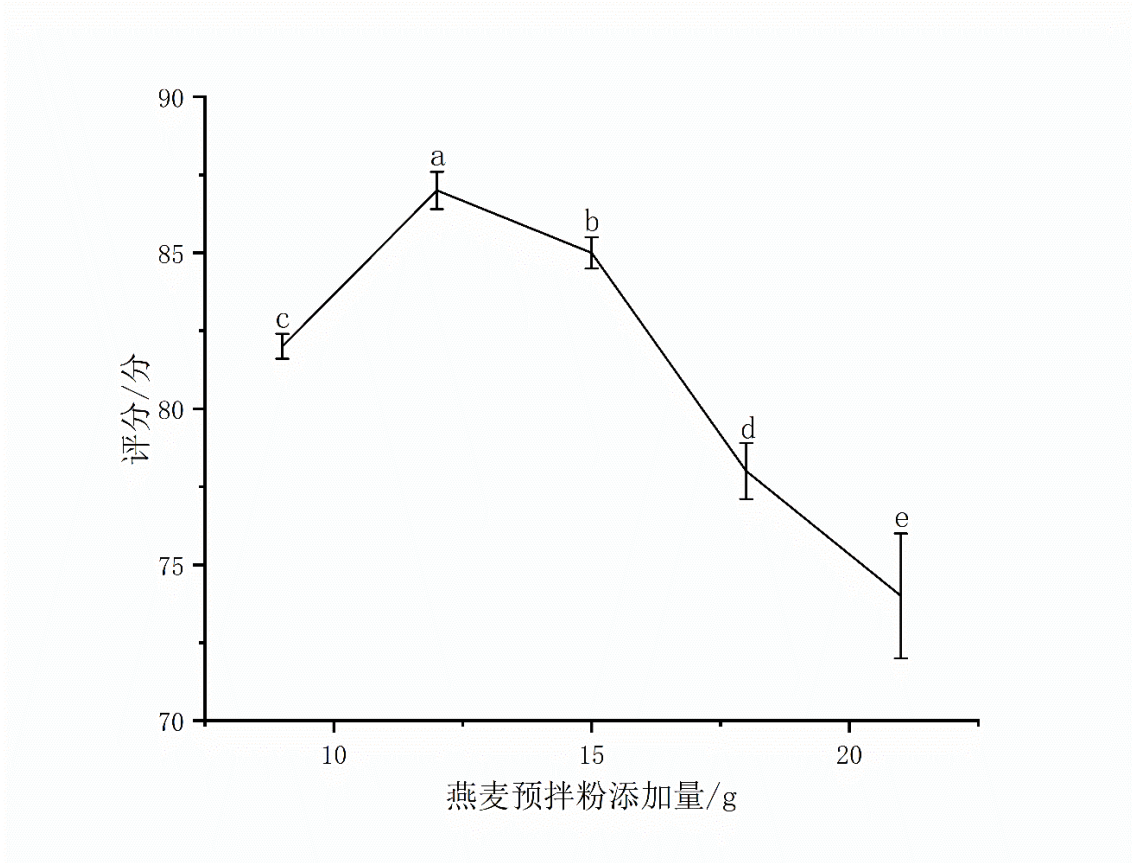


图 4-4 燕麦预拌粉添加量对芡实麦棒品质的影响

Fig. 4-4 Effect of oatmeal premix addition on the quality of Euryale Ferox oatmeal bars

4.4.5 正交实验优化芡实麦棒品质

由单因素试验结果，分别将芡实麦棒配方中的芡实添加量、全麦粉添加量、低筋粉添加量、燕麦预拌粉添加量进行 3 水平 4 因素 L9(3⁴)正交实验。实验设计如表 4-4。

表 4-4 正交实验因素水平表
Table 4-4 Orthogonal Experiment Factor Level Table

因素名称	芡实粉/g	全麦粉/g	低筋粉/g	燕麦预拌粉/g
水平 1	10	50	50	9
水平 2	15	55	55	12
水平 3	20	60	60	15

表 4-5 正交实验方案和结果

Table 4-5 Orthogonal experimental scheme and results

编号	芡实粉/g	全麦粉/g	低筋粉/g	燕麦预拌粉/g	实验结果/g
1	1	1	1	1	76
2	1	2	2	2	78
3	1	3	3	3	80
4	2	1	2	3	82
5	2	2	3	1	82
6	2	3	1	2	82
7	3	1	3	2	84
8	3	2	1	3	87
9	3	3	2	1	81
k ₁	78.000	80.667	81.667	79.667	
k ₂	82.000	82.333	80.333	81.333	
k ₃	84.000	81.000	82.000	83.000	
R	6.000	1.666	1.667	3.333	

结果如表 4-5，影响芡实麦棒品质的最大因素为芡实粉添加量，其次为燕麦预拌粉添加量，之后是低筋粉和全麦粉。分别对 A₃B₂C₁D₃ 和 A₃B₂C₃D₃ 配方进行制备芡实麦棒并进行感官分析，A₃B₂C₃D₃ 评分为 88±0.5，A₃B₂C₁D₃ 评分为 86±1 分。因此选择 A₃B₂C₃D₃ 配方，即芡实粉添加量为 20 g，全麦粉添加量为 55 g，低筋粉添加量为 60 g，燕麦预拌粉添加量为 15 g。

4.4.6 芡实粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

如图 4-5，消化率随着芡实添加量的增大呈现先降低后增高的趋势。这可能是由于芡实含有没食子酸、双没食没食子酸酯、表儿茶素、原花青素、儿茶素、没食子酸衍生物等酚类物质，这些酚类物质是抑制淀粉消化吸收的重要成分，对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活力具有非常好的抑制效果^[151]。但是当添加芡实粉过多时，虽然酚类物质增多，但是淀粉含量也增多。虽然在芡实粉添加量在 20 g、25 g、30g 没有显著性差异，但是考虑到是制作芡实类食品，因此选择芡实粉添加量为 25-35 g。

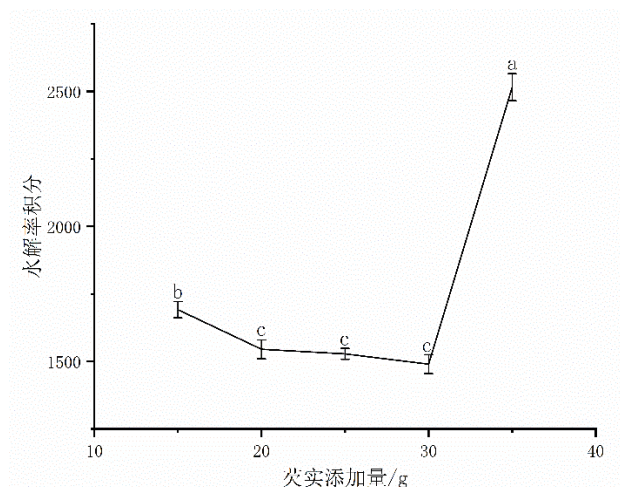


图 4-5 芡实粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

Fig. 4-5 Effect of the amount of Euryale Ferox powder added on the digestibility of Euryale Ferox meal replacement powder

4.4.7 白芸豆粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

如图 4-6 所示, 水解率随着白芸豆添加量的增大呈现增高的趋势。产生这种现象的原因是虽然白芸豆富含 α -淀粉酶抑制剂^[152], 会对 α -淀粉酶产生抑制效果, 但是白芸豆也富含大量的淀粉, 添加量过多也会引入更多淀粉, 又会增加水解率。因此选择白芸豆粉添加量为 20-30 g。

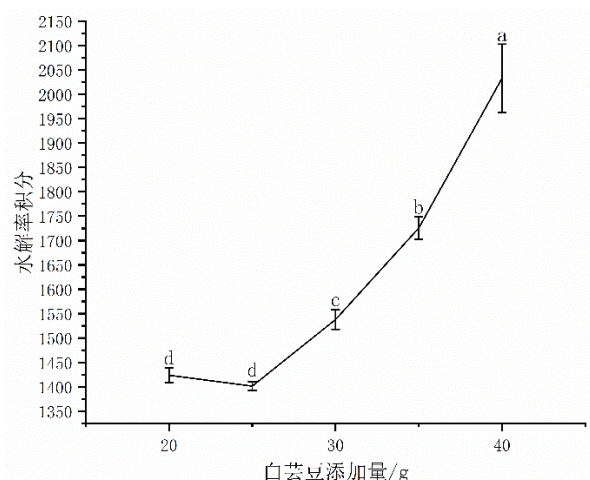


图 4-6 白芸豆粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

Fig. 4-6 Effect of great northern bean powder addition on digestibility of Euryale ferox meal replacement powder

4.4.8 藜麦粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

如图 4-7 所示, 水解率随着藜麦粉添加量的增大呈现先降低后增高的趋势。因为藜麦中含有较多的膳食纤维, 吕晨晨^[21]等实验中提取的膳食纤维占比高达

18.13%。膳食纤维不易被水解，因此影响代餐粉的水解率，按照图 4-7 的趋势，添加更少量的藜麦粉为宜，因此固定藜麦粉添加量为 30 g。

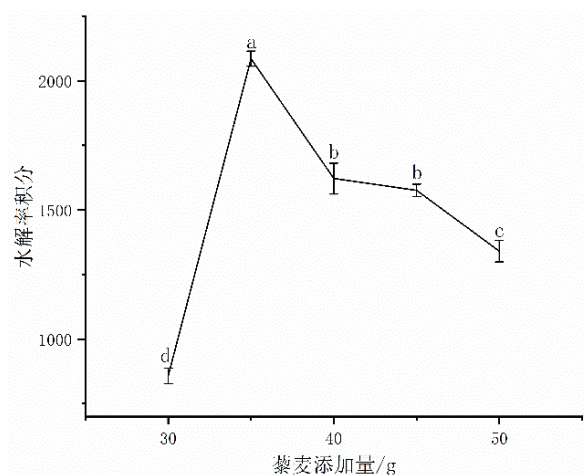


图 4-7 藜麦粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

Fig. 4-7 Effect of quinoa powder addition on digestibility of Euryale ferox meal replacement powder

4.4.9 魔芋粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

如图 4-8 所示，魔芋粉添加量增多，水解率呈下降的趋势，这是因为魔芋粉富含葡甘露聚糖，这是一种高黏性的可溶性膳食纤维，能够吸水膨胀形成凝胶状物质，延缓样品与水解酶的接触，从而降低水解速率。但是并不是添加魔芋粉越多越好，魔芋有草腥味，因此对于代餐粉产品可以少量加入以降低消化率。因此添加量为 3-5 g。

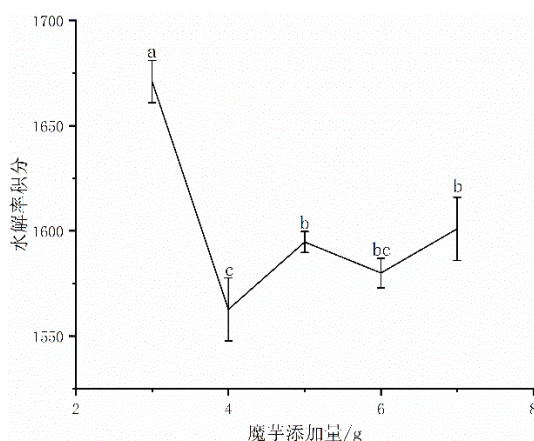


图 4-8 魔芋粉添加量对芡实代餐粉水解率的影响

Fig. 4-8 Effect of konjac flour addition on digestibility of Euryale ferox meal replacement powder

4.4.10 响应面优化分析

根据单因素实验结果，固定藜麦粉添加量为 30g。响应面实验以芡实粉（25、30、35 g）、白芸豆粉（20、25、30 g）、魔芋粉（3、4、5 g）添加量为三个因素，

每个因素选择三个水平，根据 Box-Benhnken 中心组合试验设计原理进行响应面实验，如表 4-6。

表 4-6 响应面实验设计结果

Table 4-6 Response surface experimental design results

序号	A 芡实粉/g	B 白芸豆粉/g	C 魔芋粉/g	水解率
1	25	20	4	1543.75
2	35	20	4	2342.34
3	25	30	4	2446.80
4	35	30	4	1804.01
5	25	25	3	2230.45
6	35	25	3	2034.49
7	25	25	5	1510.74
8	35	25	5	1539.26
9	30	20	3	2337.52
10	30	30	3	1978.25
11	30	20	5	1636.66
12	30	30	5	1573.04
13	30	25	4	1425.25
14	30	25	4	1382.41
15	30	25	4	1739.84
16	30	25	4	1346.36
17	30	25	4	1422.39

响应面实验结果如表 4-6 所示，用 Design-Expert 13 对以芡实代餐粉的体外水解率为响应值的回归模型进行拟合，得到水解率回归模型方程：

$$Y=1463.25-1.45A-7.27B-290.13C-360.35AB+56.12AC+73.91BC+259.17A^2+311.80B^2+106.31C^2。$$

由表 4-7 可知，该模型达到极显著水平（ $P<0.01$ ），证明残差是由随机误差导致的， $R^2=0.9140$ 表示水解率的变化 91.40%是由实验中的三个因素引起的，说明该模型可以和本次实验的体外消化结果很好地拟合，能够表达各原料对芡实代餐粉水解率的影响。 P 值小于 0.0500 表示模型项具有显著性。在这种情况下， C 、 AB 、 A^2 、 B^2 是重要的模型项。大于 0.1000 的值表明模型项不重要。

表 4-7 二次模型的方差分析

Table 4-7 Analysis of variance of quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	2038000.00	9	226500.00	8.26	0.0055	显著
A	16.94	1	16.94	0.0006	0.9809	
B	422.97	1	422.97	0.0154	0.9046	
C	673400.00	1	673400.00	24.56	0.0016	
AB	519400.00	1	519400.00	18.95	0.0033	
AC	12597.82	1	12597.82	0.4595	0.5196	
BC	21852.23	1	21852.23	0.7971	0.4016	
A ²	282800.00	1	282800.00	10.32	0.0148	
B ²	409400.00	1	409400.00	14.93	0.0062	
C ²	47589.95	1	47589.95	1.74	0.2291	
残差	191900.00	7	27413.89			
失拟向	92083.29	3	30694.43	1.23	0.4082	不显著
纯误差	99813.95	4	24953.49			
总差	2230000.00	16				

各因素及各因素间的交互作用对水解率的影响清晰的呈现在响应面图上，曲面越陡峭，该因素交互作用对水解率的影响程度就越大。图 4-9A 为芡实粉和白芸豆交互，图 4-9B 为白芸豆粉与魔芋粉交互，图 4-9C 为芡实粉与魔芋粉交互。利用响应面结果选择芡实代餐粉最佳优化配方为：芡实粉添加量 31.065 g，藜麦粉 30.000 g，白芸豆粉 25.141 g，魔芋粉 4.703 g。此配方下有最低水解率 1331.04。考虑到实验的准确性，固定配方为芡实粉添加量为 31.0 g，藜麦粉添加量为 30.0 g，白芸豆粉添加量为 25.0 g，魔芋粉添加量为 5.0 g。在此配方下测定水解率为 1307.84 与理论预测值相近。

4.5 本章小结

本章主要对芡实麦棒和芡实代餐粉配方进行优化和研究。根据原有麦棒配方对芡实麦棒进行复配，以感官评定作为指标，通过单因素实验研究各原料添加量对芡实麦棒感官品质的影响，确定各原料添加范围。芡实粉添加量 15-25 g，全麦粉添加量 50-60 g，低筋粉添加量 50-60 g，燕麦预拌粉 9-15 g。然后通过正交实验确定各原料最适添加量，对 A₃B₂C₁D₃ 和 A₃B₂C₃D₃ 配方进行评分，最终确定配方为芡实粉添加量为 20 g，全麦粉添加量为 55 g，低筋粉添加量为 60 g，燕麦

预拌粉添加量为 15 g。芡实代餐粉以水解率作为指标,通过单因素确定 3 个水平,芡实粉添加量 25-35 g,白芸豆添加量 20-30 g,固定藜麦添加量 30 g,魔芋粉添加量 3-5 g。然后进行响应面分析,确定配方为芡实粉添加量为 31 g,藜麦粉添加量为 30 g,白芸豆粉添加量为 25 g,魔芋粉添加量为 5 g。芡实类食品的研发有助于芡实的高效利用,从而为芡实从业者提高经济收入。

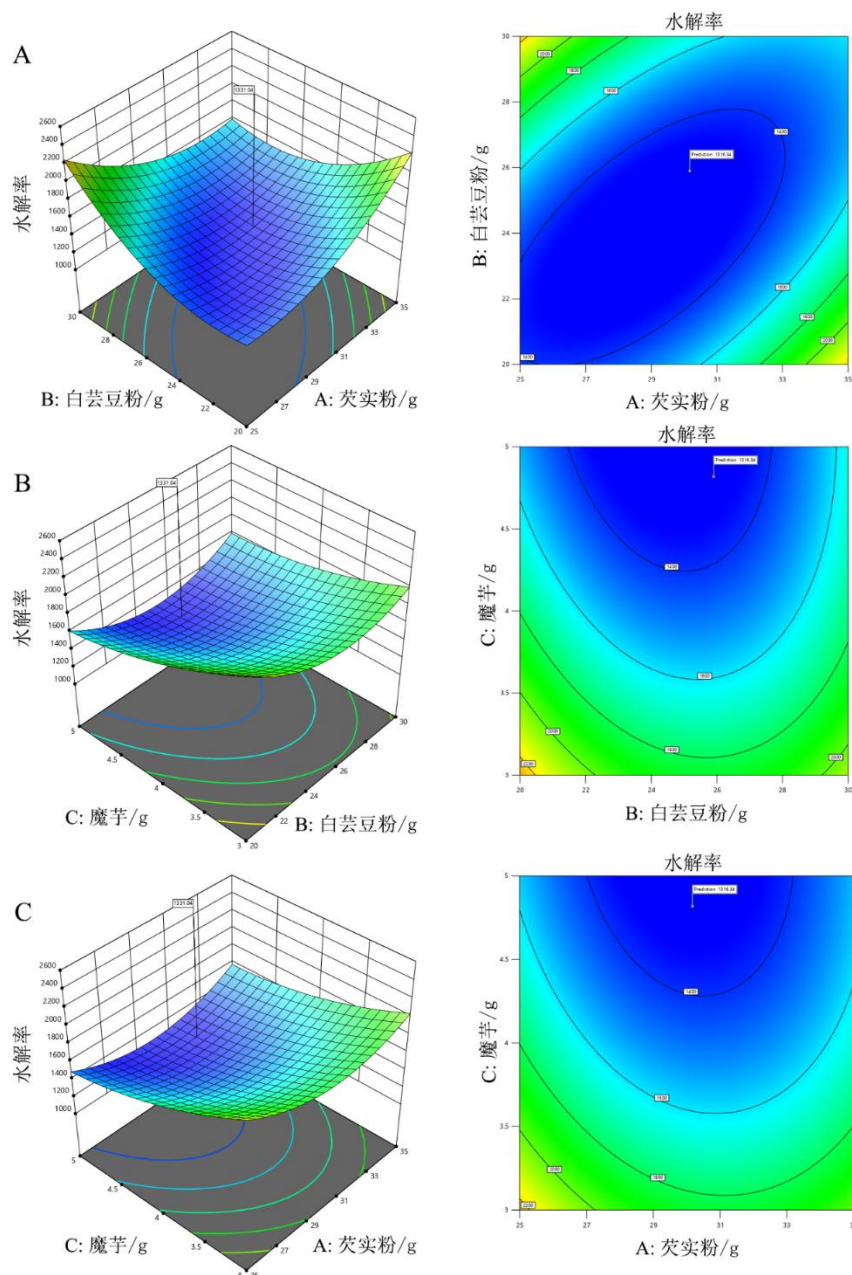


图 4-9 两因素交互响应面

Fig. 4-9 Two-factor interaction response surface

第 5 章 芡实麦棒和代餐粉理化特性及体外消化分析

5.1 前言

淀粉在人类饮食中起着至关重要的作用，广泛存在于多种主食和各种其他食品中。它不仅是人体必需能量的重要来源，而且对健康状况和疾病风险也有重大影响。随着现代生活节奏的加快和饮食习惯的改变，越来越多的研究开始关注食物的营养成分及其对健康的潜在影响。然而，含有煮熟淀粉的富含碳水化合物的加工食品，如面条、包子和面包，已被证明会导致餐后血糖反应迅速飙升。随着时间的推移，这显著增加了饮食相关疾病的风险。作为人类日常膳食中碳水化合物的主要来源，调节淀粉的消化率对于维持血糖水平、预防慢性疾病、促进消化系统健康具有重要意义。因此，通过各种方法减缓人类膳食中淀粉的消化并创造个性化的营养淀粉产品具有科学意义和实用价值^[153]。自由基是机体氧化代谢的副产物，能够对细胞造成氧化损伤，导致衰老和多种疾病，如动脉粥样硬化、肿瘤和代谢疾病。抗氧化剂通过中和自由基，减少氧化损伤，在延缓衰老和预防疾病中发挥重要作用。近年来，随着对抗氧化需求的增加，开发高效、安全的抗氧化剂已成为食品和医药领域的研究热点，旨在通过天然提取或合成新型抗氧化剂，提升人体抗氧化能力，促进健康^[154]。

电子鼻和电子舌系统是基于嗅觉和味觉仿生的检测系统，电子鼻是根据嗅觉原理设计的，电子舌则模拟了味觉细胞与外界刺激相互作用的机制。电子鼻和电子舌系统均由传感器阵列、数据采集模块和决策单元组成。这些组件协作实现物质的智能检测^[155]。

5.2 材料与仪器

5.2.1 材料与试剂

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

试剂/材料	级别/规格	厂家
总抗氧化能力测试盒	50 管/48 样	苏州科铭生物技术有限公司
超氧阴离子清除能力测试盒	50 管/48 样	苏州科铭生物技术有限公司
市售营养粉、白面包	-	市场购买
总酚含量检测试剂盒	-	北京索莱宝科技有限公司

5.2.2 仪器与设备

表 5-2 实验仪器
Table 5-2 Experimental instruments

仪器	型号	厂家
电子鼻	PEN3	北京盈盛恒泰科技有限责任公司
电子舌	SA402B	北京盈盛恒泰科技有限责任公司
质构仪	FTC	北京盈盛恒泰科技有限责任公司
紫外可见分光光度计	TU-1900	北京普析通用仪器有限责任公司
油脂氧化分析仪	OXITEST	北京盈盛恒泰科技有限责任公司

5.3 实验方法

5.3.1 体外淀粉消化测试

同 4.3.7 的方法，计算出淀粉水解率。淀粉水解指数(hydrolysis index, HI)的计算方法是在 Origin 2022 软件上绘制以时间为横坐标，淀粉水解率为纵坐标的水解曲线，计算白面包、芡实代餐粉、芡实麦棒在 180 min 的淀粉水解曲线下的面积积分，各样品与白面包面积的比值即为淀粉水解指数，如公式 (5-1)。食物的血糖生成指数(eGI)可由淀粉水解指数计算得到，如公式 (5-2)。

$$HI = \frac{\text{不同样品消化曲线面积}}{\text{白面包消化曲线面积}} \times 100 \quad (5-1)$$

$$eGI = 0.862HI + 8.19818 \quad (5-2)$$

5.3.2 电子舌测试

分别取芡实代餐粉及各原料粉 1.00 g 和 100 mL 蒸馏水混合并搅拌均匀，在 4900 r/min 离心 10 min 得上清液，采用电子舌对其五味（苦、涩、鲜、咸、甜）进行测定。用 KCl 和酒石酸混合溶液作为参照溶液，负极清洗液为水+乙醇+HCl，正极清洗液为 KCl+水+乙醇+KOH。将传感器置于参比溶液中归零 30 s，随后开始进行味觉指标测定。测试时间为 30 s，测试完毕后用参比溶液清洗 3 s，再次进行测定，测试时间 30 s。苦、涩、鲜、咸重复测 4 次，甜味重复测 5 次，取后 3 次数据作为测试结果。

5.3.3 电子鼻测试

参考范东翠^[156]的方法，分别取 0.5 g 芡实代餐粉、原料粉和 5 mL 蒸馏水混匀，并置于 25 mL 密封瓶，在 27 °C 培养箱平衡 1 h，采用电子鼻（10 个气体传

感器)对其风味进行测定。测试前,首先将电子鼻清洗 300 s。测试参数为:清洗时间 80 s,测定时间 80 s,等待时间为 10 s,气体流量 500 mL/min,试验重复 4 次,取后 3 次结果分析。电子鼻各传感器特性^[157]如表 5-3 所示。

表 5-3 电子鼻传感器参数
Table 5-3 Electronic nose sensor parameters

编号	传感器简称	传感器性能
1	W1C	主要检测芳香族化合物
2	W5S	响应物质范围广且灵敏度高,主要检测氮氧化合物
3	W3C	主要检测氨气及芳香族化合物
4	W6S	主要检测氢气
5	W5C	主要检测烷烃类化合物、芳香族化合物以及弱极性化合物
6	W1S	响应物质范围广,对甲烷敏感
7	W1W	对无机硫化物、含硫有机物以及萜烯类、吡嗪类化合物敏感
8	W2S	响应物质范围广,主要检测乙醇以及部分芳香族化合物
9	W2W	主要检测芳香族化合物以及含硫有机化合物
10	W3S	对甲烷选择性较强

5.3.4 麦棒质构测试

将整块芡实麦棒置于质构仪上,选择 TPA1000N,测试速率 2 mm/s,起始力 0.3 N,压缩程度设为 60%,停留间隔 5 s,测定芡实麦棒的硬度、弹性以及咀嚼性,重复 3 次。

5.3.5 麦棒货架期测试

使用油脂氧化分析仪,分别设置温度为 70、80、90 ℃,得到诱导期(IP)数据。重复实验,对得到的数据进行拟合,预估在 25 ℃的货架期。

5.3.6 总酚含量测试

按照说明分别将 0.1 g 芡实营养代餐粉和市售营养粉以及芡实麦棒研磨粉加入至提取液,具体实验步骤以试剂盒说明书为准。在 760 nm 测定吸光度。绘制标准曲线,按照公式(5-3)计算测试管总酚含量。

$$\text{总酚含量} \text{mg/g} = 2.5x \div W \quad (5-3)$$

注: x 为试管总酚浓度 mg/mL, W 为样本质量 g。

5.3.7 抗氧化测试

分别将 0.1 g 芡实代餐粉和市售营养粉以及芡实麦棒研磨粉加入至提取液，具体实验步骤以超氧离子清除能力测试盒说明书为准。在 530 nm 处测定吸光度，计算 $O_2^{\cdot-}$ 清除能力。按照公式（5-4）计算超氧阴离子清除率。

$$\text{超氧阴离子清除率} = \frac{\text{对照管吸光度} - \text{测试管吸光度}}{\text{对照管吸光度}} \times 100\% \quad (5-4)$$

分别将 0.1 g 芡实代餐粉和市售营养粉以及芡实麦棒研磨粉加入至提取液，具体实验步骤以总抗氧化能力测试盒说明书为准。在 593 nm 处测定吸光度，通过公式（5-5）按样品质量计算总抗氧化能力。

$$\text{总抗氧化能力} = 0.4027 \times (\Delta A - 0.0134) \div W \quad (5-5)$$

注： ΔA 为吸光度的差值， W 为样品质量。

5.4 结果与分析

5.4.1 体外淀粉消化结果分析

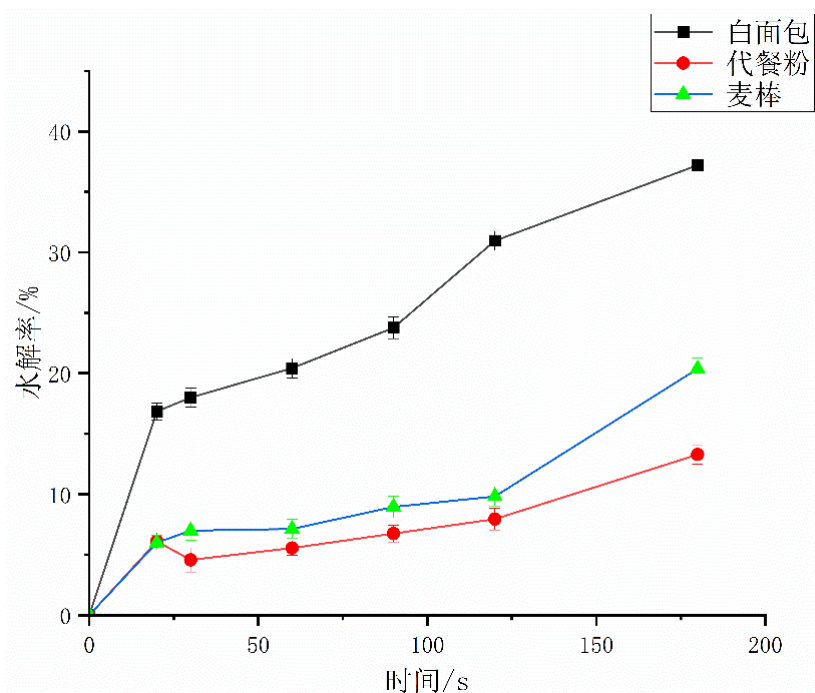


图 5-1 淀粉水解曲线

Fig. 5-1 Starch hydrolysis curve

如图 5-1，白面包、代餐粉、麦棒在 0-30 min 水解率快速升高，在 30-60 min，水解率变化不大。在 60-90 min，白面包水解率迅速增大，而此时代餐粉和麦棒

水解率增加幅度较小。在 60-180 min 时，代餐粉的水解率缓慢升高，麦棒水解率在 120 min 产生较大波动。白面包的整体水解率大于麦棒大于代餐粉，对水解率曲线与时间进行积分。见表 5-4，以白面包的升糖指数为 100，代餐粉和麦棒的估计升糖指数分别为 33.55、42.42，食品 GI 值分为三类：低（<55）、中（55-69）和高（>70）^[158]，因此芡实代餐粉和芡实麦棒均属于低 GI 食品。

低 GI 食品通过缓慢释放葡萄糖，有助于维持血糖平稳，减少血糖波动，从而在控制体重、预防糖尿病和心脏病等慢性疾病方面发挥积极作用；同时，富含膳食纤维，增加饱腹感，并能提供持久的能量，是健康饮食的重要组成部分。

表 5-4 估计血糖生成指数
Table 5-4 Estimated glycemic index

	面积	HI	eGI
白面包	4446.74	100.00	100.00
代餐粉	1307.84	29.41	33.55
麦棒	1765.45	39.70	42.42

5.4.2 电子舌结果分析

电子舌通过把化学信号转化为电信号再转化为味觉值，可以检测不同味觉之间的细微不同^[159]，常用来检测同一物料不同处理方法所形成的味道差异。为了研究代餐粉与其原料之间的味觉差异，对滋味进行详细分析。

如表 5-5 所示，指标有苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富度（鲜味回味）、咸味、甜味，把响应值小于参比液的视为无味点，即在该滋味下无味道。咸味传感器的指标下，代餐粉以及原料的响应值全部都小于-6，因此，代餐粉及其原料不具有咸味。

图 5-2 可以清晰的展示出各原料在苦味回味及涩味回味方面差异极小，而在甜、鲜、苦滋味方面具有显著差别。芡实的甜、苦滋味更加高，但是鲜味较低。白芸豆鲜味明显而甜味较低，魔芋苦味和甜味低。苦味的高低主要因为其黄酮含量，黄酮通常被描述为微苦、涩。黄酮具有多种功能性作用，如抗氧化、抗炎、心血管保护作用等。代餐粉相比于各原料滋味比较均衡。图 5-3 对电子舌 5 味进行 PCA 分析，更加展现了代餐粉滋味的均衡性，代餐粉在 PC1 上以及 PC2 上相比于各原料都处于中间位置。

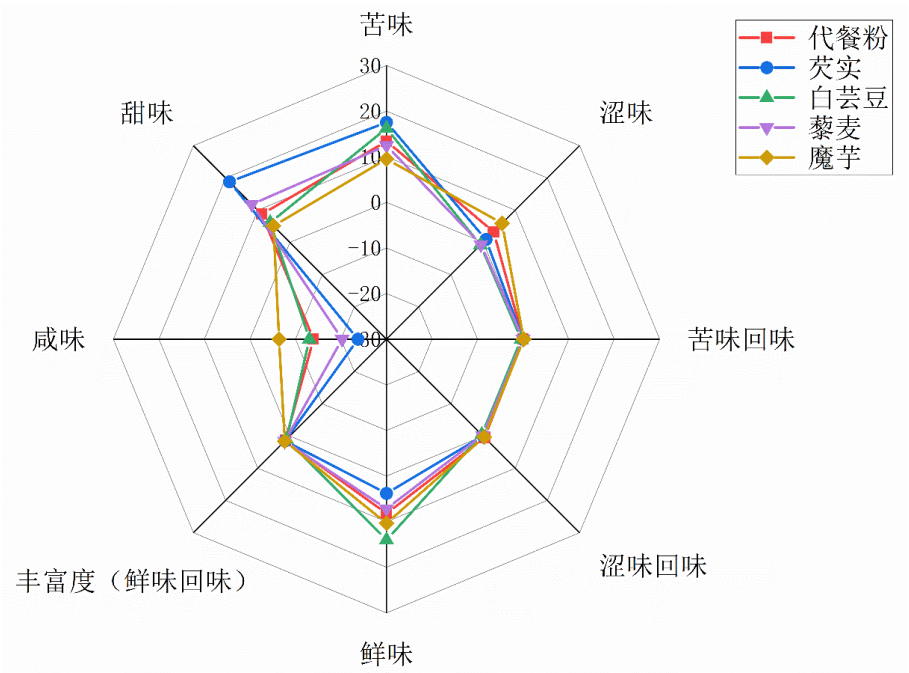


图 5-2 电子舌 5 味雷达图
Fig. 5-2 Electronic tongue 5-flavor radar chart
表 5-5 电子舌 5 味指标结果

	苦味	涩味	苦味回味	涩味回味	鲜味	丰富度	咸味	甜味
参比液	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-6.00	0.00
代餐粉	13.17	3.18	0.09	0.42	8.43	1.31	-13.98	9.35
	13.44	3.31	0.03	0.45	8.22	1.45	-13.95	8.72
	13.54	3.39	0.00	0.49	8.02	1.43	-13.93	8.14
芡实	17.20	1.19	0.00	-0.02	3.90	1.50	-24.34	20.07
	17.49	0.68	-0.06	-0.03	3.74	1.53	-23.58	18.69
	17.84	0.85	-0.07	-0.02	3.73	1.59	-23.29	17.52
白芸豆	15.77	-0.88	-0.30	-0.38	13.98	1.00	-13.17	6.22
	16.28	-0.83	-0.40	-0.40	14.05	1.12	-13.12	6.15
	16.58	-0.78	-0.54	-0.36	14.04	1.09	-12.95	6.02
藜麦	12.04	-0.63	0.06	-0.18	7.22	1.60	-20.34	12.21
	12.40	-0.63	-0.01	-0.12	7.19	1.65	-20.18	11.35
	12.88	-0.70	-0.06	-0.14	7.08	1.67	-20.21	11.90
魔芋	9.33	5.98	0.39	0.31	10.33	1.60	-6.57	5.21
	9.48	5.87	0.16	0.34	10.33	1.53	-6.37	5.09
	9.64	5.78	-0.20	0.34	10.37	1.71	-6.23	5.07

5.4.3 电子鼻结果分析

代餐粉及其原料的电子鼻检测结果如图 5-4 所示, 各组分在传感器 6、7、8、9 产生较大差异, 对应的检测指标为对甲烷敏感、对无机硫化物、含硫有机物以及萜烯类、吡嗪类化合物敏感、乙醇以及部分芳香族化合物及含硫有机化合物。

藜麦在传感器 7 和 9 响应值较高, 7 和 9 的传感器的特点是对含硫有机化合物及萜烯类敏感。这可能与藜麦中的不饱和脂肪酸及皂苷、多酚类、黄酮类、甜菜碱、植物甾醇等的含量有关^[160]。魔芋在传感器 6 和 8 有较高的响应值, 6、8 分别为对甲烷及部分芳香族化合物敏感, 魔芋具有明显的腥味, 有研究者认为其气味主要为二甲基二硫和二甲基三硫^[161]。

图 5-5 显示了电子鼻 PCA 分析结果, 各原料范围处于 1、4 象限, 而代餐粉处于 2、4 象限, 这说明制成的代餐粉并不是简单的原料堆砌, 而是各原料间产生了相互作用, 制成了有别于原料气味的产品。

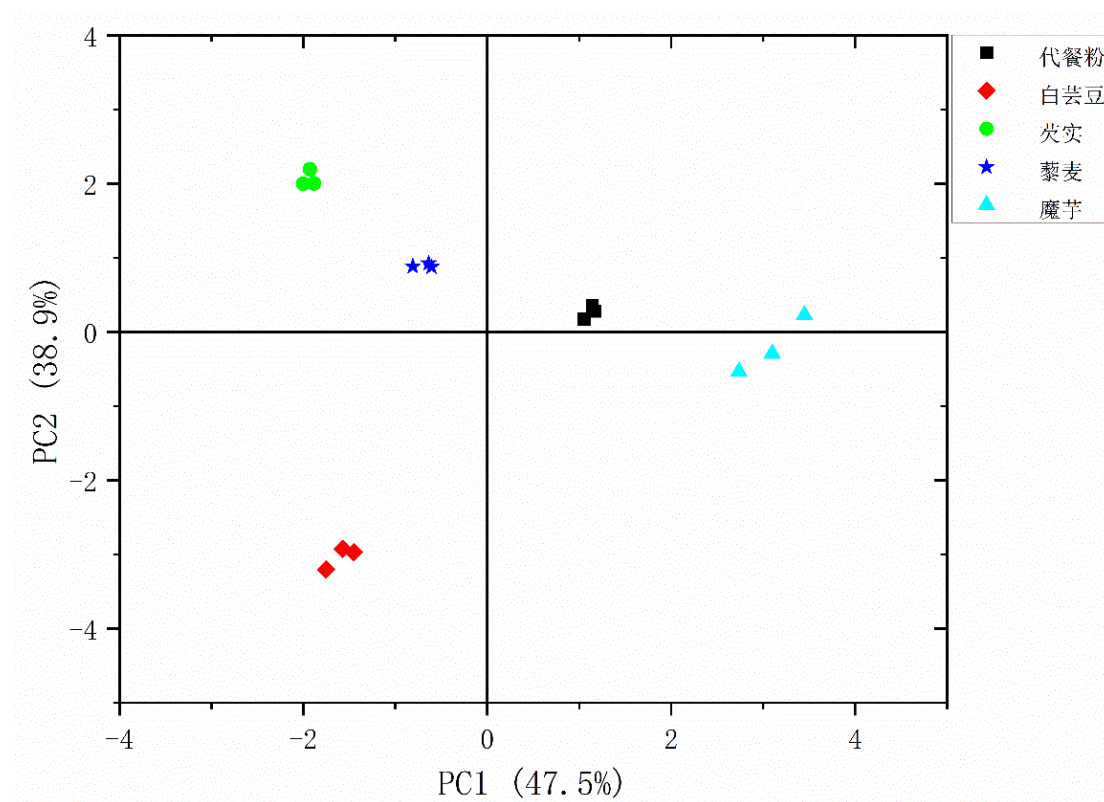


图 5-3 电子舌 5 味 PCA 图

Fig. 5-3 PCA diagram of five tastes of electronic tongue

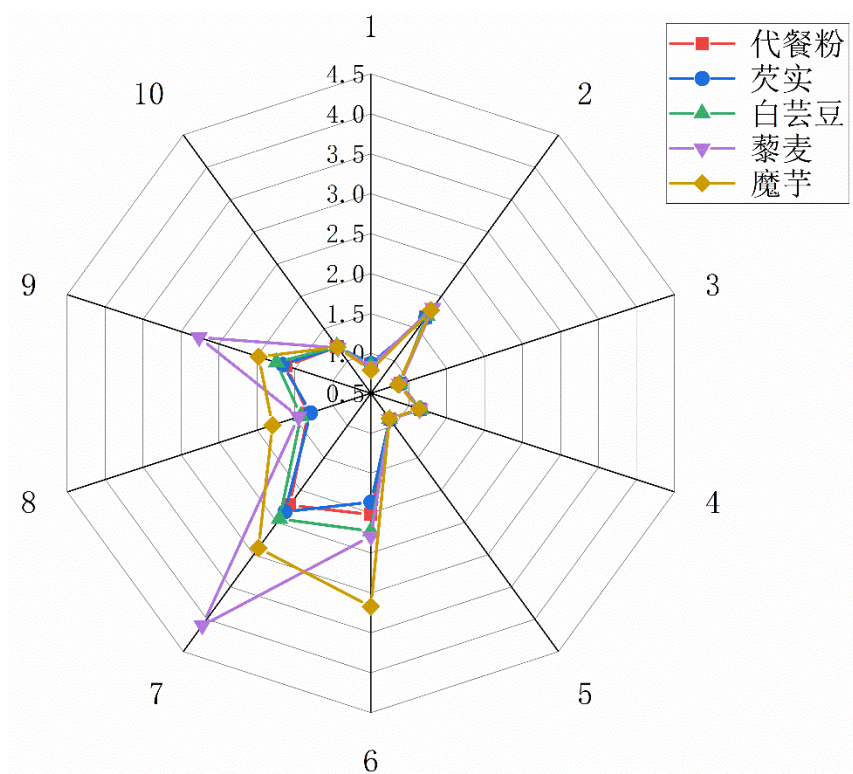


图 5-4 电子鼻雷达图

Fig. 5-4 Electronic nose radar image

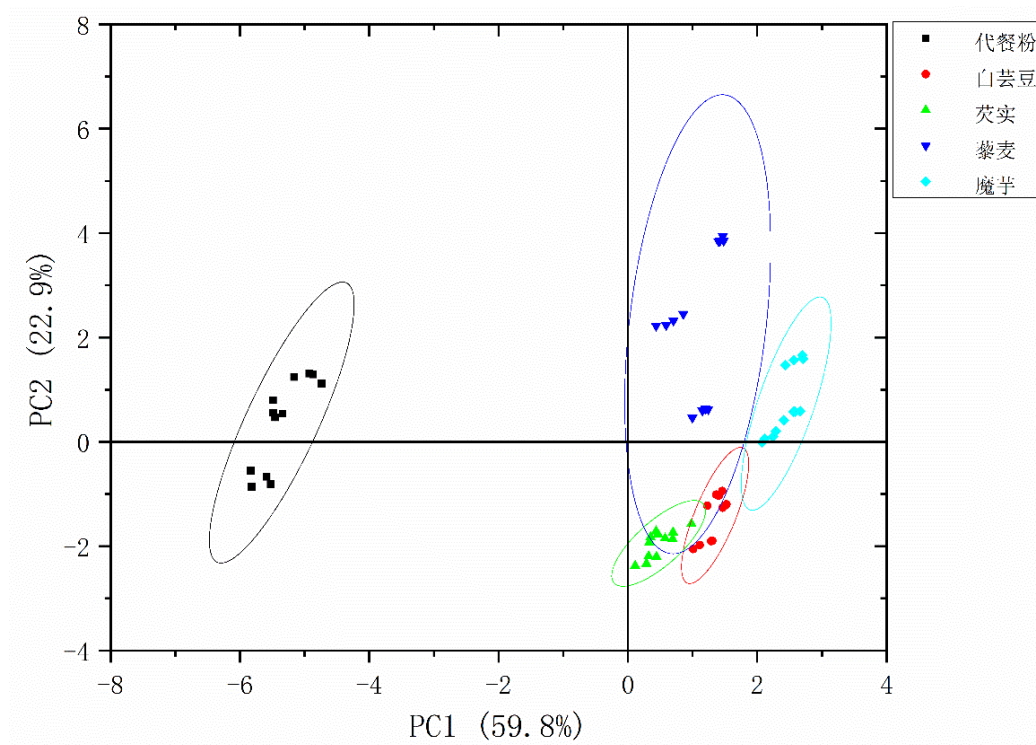


图 5-5 电子鼻 PCA 图

Fig. 5-5 PCA diagram of electronic nose

5.4.4 麦棒质构结果分析

麦棒的硬度、咀嚼性是麦棒的重要指标,通过实验得到麦棒的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性分别为 345.70 N、5.94 mm、40.60 N、241.23 mJ。通过检索其他研究者的饼干和能量棒的研究文献,发现马金鸽^[162]的油菜籽蛋白青稞饼干的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性是远小于麦棒。而王金秋^[163]制作的蛋清蛋白棒的硬度及咀嚼性分别介于 600-800 N、400-600 mJ 又显著高于麦棒。高硬度有利于保持产品的完整性,但是会影响食用口感。因此制作出硬度合适的麦棒产品既能保证产品的完整性,又不会导致产品难以咀嚼。

5.4.5 麦棒货架期结果分析

芡实麦棒的原料中含有食用油,因为油脂易发生氧化,因此对麦棒的货架期进行测试。如图 5-6 所示。当保藏温度为 25 ℃时,计算出货架期为 458.53 h,即 19.11 天。

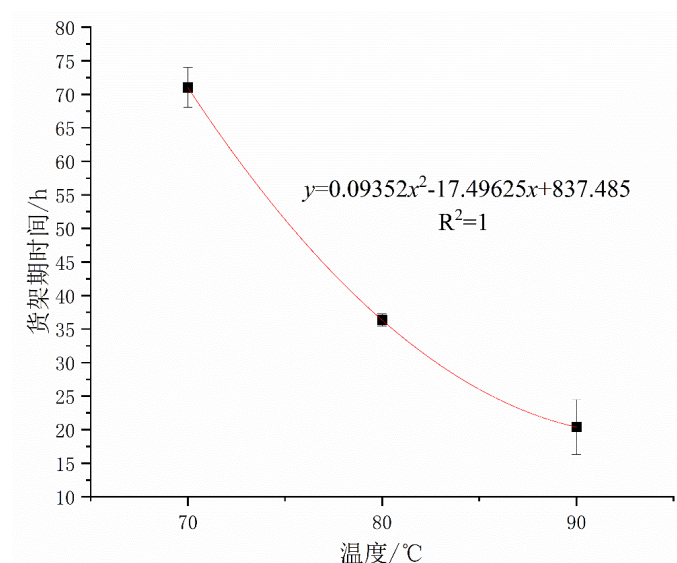


图 5-6 麦棒货架期预测曲线

Fig. 5-6 Prediction curve of shelf life of oatmeal bars

5.4.6 总酚结果分析

以没食子酸为标样,溶剂为水,分别配置浓度为 0.0025、0.005、0.01、0.02、0.039 mg/mL 的没食子酸溶液,按试剂盒操作,测定在 760 nm 处的吸光度绘制标准曲线如图 5-7。标准曲线函数为:

$$y = 0.00572x - 0.00168 \quad R^2 = 0.9999$$

注: y 为吸光度, x 为试管总酚浓度 mg/mL。

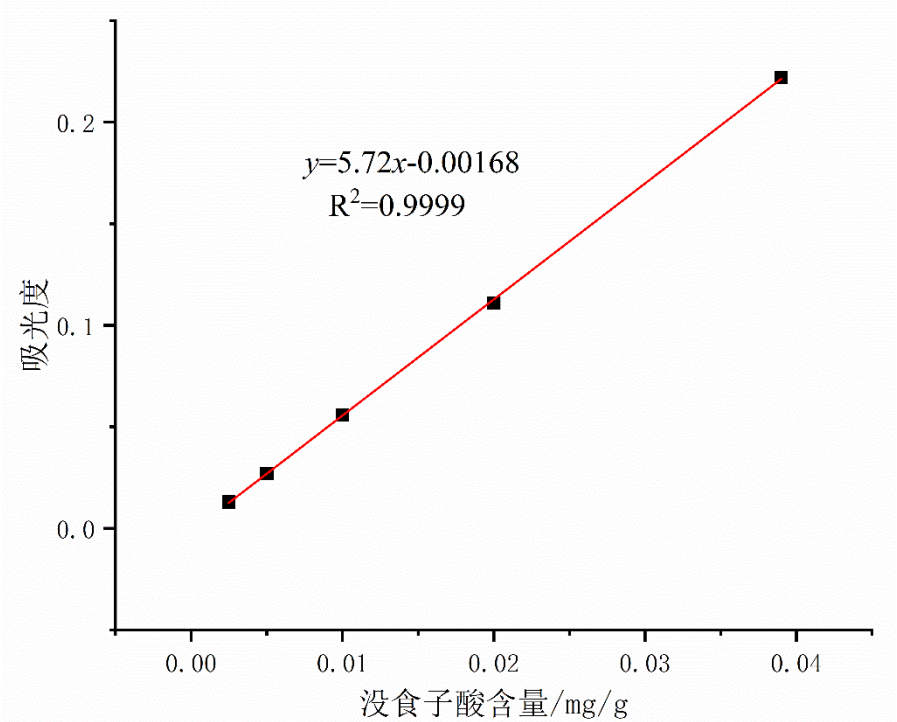


图 5-7 总酚标准曲线

Fig. 5-7 Total phenol standard curve

表 5-6 总酚含量测试结果

Table 5-6 Total phenol content test results

	市售营养粉	芡实代餐粉	芡实麦棒
吸光度	0.074±0.006	0.205±0.006	0.082±0.005
总酚含量 mg/g	0.330±0.025	0.903±0.027	0.366±0.022

酚类物质是葡萄中一类重要的次生代谢物质，主要包括花色苷、黄酮醇及黄烷醇等类黄酮物质，以及酚酸和芪类^[164]等。酚类化合物是一类重要的天然抗氧化剂，它们通过多种机制清除自由基、螯合金属离子、抑制氧化酶活性和增强内源性抗氧化系统，从而发挥抗氧化作用。以市售营养粉的总酚含量 0.330 mg/g 作为对照，芡实麦棒的总酚含量比市售营养粉高 10.91%，芡实代餐粉总酚含量比市售营养粉高 173.64%。表明芡实麦棒和芡实代餐粉具有一定的抗氧化能力。

5.4.7 抗氧化结果分析

表 5-7 抗氧化分析结果

Table 5-7 Antioxidant analysis results

样品	市售营养粉	芡实代餐粉	芡实麦棒
超氧阴离子清除率/%	2.33±0.07	5.90±0.11	2.93±0.05
总抗氧化能力/μmol Trolox/g	1.23±0.02	2.73±0.05	0.93±0.02

超氧阴离子 (O_2^-) 是一种带有负电荷的氧分子, 由氧气获得一个电子形成。它在生物体内具有双重作用: 适量时参与细胞信号传导, 调节生理过程; 过量则会导致氧化应激, 损伤细胞膜、蛋白质和 DNA, 与多种疾病相关。如表 5-7, 按照试剂盒说明, 取 0.1 g 样品加入 1 mL 提取液测试超氧阴离子清除率, 芡实代餐粉比市售营养粉超氧阴离子清除率高 153.22%, 芡实麦棒比市售营养粉超氧阴离子清除率高 25.75%。说明芡实产品具有一定的超氧阴离子清除能力, 对机体健康有益。

总抗氧化能力结果显示, 芡实代餐粉的总抗氧化能力是市售营养粉的 2.22 倍, 芡实麦棒也具有抗氧化能力, 但是比市售营养粉低 24.39%。芡实代餐粉中有大量的黄酮、多糖、甾苷等具有生物活性的物质, 既可以抑制氧自由基的产生也可以清除活性氧。

5.5 本章小结

本章对两种芡实产品的风味和功能性做了分析研究, 主要为芡实麦棒的体外消化、质构、货架期、总酚及抗氧化分析, 以及对芡实代餐粉的体外消化、电子鼻电子舌、总酚及抗氧化分析。结果表明, 芡实麦棒属于低 GI 食品, 在质构分析中, 其硬度以及咀嚼性介于其他研究者的饼干产品和能量棒产品之间, 既能保持产品贮藏及运输中的完整性, 又不会造成食用过程中的咀嚼困难, 货架期为 19.11 天, 麦棒总酚含量大于对照的市售营养粉, 也在超氧阴离子清除率方面大于市售营养粉, 但是在总抗氧化能力测试中低与市售营养粉。芡实代餐粉属低 GI 食品, 电子舌和电子鼻分析其整体挥发性风味和滋味相比与原料更加均衡, 并且不是简单的原料混合, 而是具有了新的风味, 总酚比市售营养粉高 173.64%, 在超氧阴离子清除率以及总抗氧化能力方面比市售营养粉高。说明芡实代餐粉有一定的抗氧化功能性。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文首先通过代谢组学和网络药理学对苏芡和刺芡进行成分分析及功能性讨论，为芡实低 GI 研究提供理论基础。其次通过微波、超声、糊化回生、酶解等多种方法对芡实淀粉进行改性研究，分析改性淀粉的各理化性质以及体外消化特性。然后根据以上对芡实的研究，通过单因素、正交、响应面分析并复配芡实麦棒和芡实代餐粉。最后对复配出的芡实麦棒和芡实代餐粉进行滋味分析和抗氧化测试。

(1) 苏芡和刺芡中有 153 种在含量方面具有显著差异的成分；在苏芡中筛选出 12 种具有缓解糖尿病及其并发症的成分以及 578 个潜在靶点，刺芡中筛选出 3 种具有缓解糖尿病及其并发症的成分及 226 个潜在靶点；GO 富集和 KEGG 富集分析结果显示，苏芡中的靶点主要富集在糖尿病性心肌病、胰岛素抵抗、高级糖基化终末产物-受体信号通路在糖尿病并发症中的作用，刺芡中的靶点主要富集在癌症的发病途径、脂肪细胞脂解的调控、腺苷酸激活蛋白激酶信号通路；分子对接分析结果显示，筛选出的成分均结合在靶点蛋白质的凹陷处，结合自由能均为负值，分子对接构象稳定。说明，苏芡在缓解糖尿病及其并发症等方面具有更好的效果。

(2) 单一方法改性和增强改性处理芡实淀粉，快消化淀粉含量较原淀粉降低 10.6%~40.2%，直链淀粉和抗性淀粉含量分别增加 69.8%~113.0%、4.47%~24.4%，改性淀粉样品的颗粒形貌发生明显变化，吸光度也在 1000~1700 cm^{-1} 及 3000~3700 cm^{-1} 有显著差异，咀嚼性、弹性、膨胀度分别降低 16.4%~97.1%、46.6%~86.5%、9.7%~24.9%，溶解度普遍升高为 18.4%~998.1%。其中，淀粉乳浓度为 16.5% 的微波压热-超声酶解增强改性淀粉的短程有序性、硬度、咀嚼性、胶粘性以及溶解度最高，为 C 型淀粉，直链淀粉含量和抗性含量均显著 ($P < 0.05$) 高于其他处理。此研究为改性芡实淀粉的特性变化以及应用提供数据支持。

(3) 复配芡实类食品，通过单因素分析、正交分析、响应面分析优化配方。最终确定芡实麦棒最佳配方是芡实粉添加量为 20 g、全麦粉添加量 55 g、低筋粉添加量 60 g、燕麦预拌粉添加量 15 g，感官品质好，色泽均匀，外观品质好，形态较完整。芡实代餐粉以芡实粉添加量 31 g、白芸豆添加量 25 g、藜麦添加量 30

g、魔芋添加量为变量 5 g，此配方下水解率最低。

(4) 对芡实麦棒和芡实代餐粉进行升糖指数的测定以及运用电子鼻和电子舌进行整体挥发性风味和滋味分析，运用试剂盒进行多酚检测和抗氧化分析。显示麦棒和代餐粉的升糖指数分别为 42.42 和 33.55，属低升糖指数食品。电子鼻和电子舌分析代餐粉相较于各原料整体挥发性风味和滋味更加均衡，PCA 分析代餐粉味道和滋味已与各原料产生区别。总酚含量测定显示麦棒和代餐粉含量比市售营养粉高，分别为 0.366 mg/g 和 0.903 mg/g。取 0.1 g 代餐粉和麦棒分析超氧阴离子清除能力分别为 5.90、2.93，大于对照组市售营养粉 2.33，代餐粉总抗氧化能力为 2.73 大于市售营养粉。

6.2 创新点

(1) 将代谢组学和网络药理学结合应用于不同品种芡实的研究，从物质微观层面揭示不同品种芡实成分间的差异代谢物，并对这些差异代谢物在调节机体糖尿病方面的机制进行分析，讨论不同品种芡实在调节糖尿病方面的优劣性，为低 GI 芡实类食品开发提供了理论支持。

(2) 利用多重方法对芡实淀粉进行改性，包括微波、超声、酶解、压热法的联合处理，多种方法的联合使用更有利于深度挖掘不同改性淀粉的升糖指数差异及其它理化指标。为低 GI 芡实食品开发提供了数据支持。

(3) 从理论方法上升到了实际的生产加工，为低 GI 芡实食品的开发提供了技术支持。

6.3 展望

(1) 代谢组学和网络药理学对芡实在糖尿病调节作用的分析主要基于理论推导，尚未进行动物实验验证。开展动物实验将有助于提高结论的准确性。

(2) 复配芡实麦棒实验中的感官评定可能存在一定程度的主观性，而人类主观评测往往会引入较大的误差。因此，应加强仪器分析以提升结果的客观性。

(3) 复配的代餐粉和麦棒均属于市场上已有产品，其特点并未能显著吸引消费者关注。下一步深入研究，结合市场需求能够推出新型芡实类食品，以丰富芡实食品的种类与数量，从而推动芡实产业的发展。

参考文献:

- [1] 金小花, 刘青青, 王 苹. 太湖流域芡实中重金属含量测定及安全性评价[J]. 食品安全导刊, 2023, 17(21): 61-64.
- [2] Yu D X, Dai C Y, Qu C, et al. Rapid classification and quantification of *Euryales* semen (*Euryale ferox* Salisb.) from different origins and varieties using multispectral fingerprints combined with machine learning methods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 140: 107239.
- [3] Huang Z, Bao K, Jing Z, et al. Small Auxin Up RNAs influence the distribution of indole-3-acetic acid and play a potential role in increasing seed size in *Euryale ferox* Salisb[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 311.
- [4] 李 杰, 刘绪强. “水中人参”芡实的食疗方法[J]. 中国食品, 2025, 54(01): 117.
- [5] 林漪清, 罗永平, 彭连共. 我院治疗腹泻型肠易激综合征的中药处方分析[J]. 临床合理用药, 2025, 18(01): 151-154+158.
- [6] 郝 瑞, 张莉莉, 顾成娟, 等. 薏苡仁、莲子、芡实治疗脾虚泄泻经验——全小林三味小方撷萃[J]. 吉林中医药, 2020, 40(08): 992-994.
- [7] 蔡嘉洛, 朱贻霖, 张志国, 等. 黄精芡实汤对 2 型糖尿病大鼠骨骼肌 PI3K-AKT -GLUT4 信号通路的影响[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(07): 1640-1642.
- [8] Bao K, Jing Z, Wang Q, et al. Quality analysis of *Euryales* Semen from different origins and varieties based on untargeted metabolomics[J]. Journal of Chromatography B, 2022, 1191: 123114.
- [9] Yu M, Qu C, Li D, et al. Study on the effects of endogenous polyphenols on the structure, physicochemical properties and in vitro digestive characteristics of *Euryales* Semen starch based on multi-spectroscopies, enzyme kinetics, molecular docking and molecular dynamics simulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137245.
- [10] 刘冠君, 张 戈, 金 铁. 双螺杆挤压对芡实物理特性的影响及其冲调粉的开发[J]. 食品工业, 2024, 45(09): 59-66.
- [11] 谢彦瑰, 肖莲荣. 鹰嘴豆芡实馒头的研制[J]. 现代食品, 2023, 29(15): 54-58.
- [12] 田晓玲, 高 鲲, 柴虹宇, 等. 无糖蓝莓渣芡实糕的研制及配方优化[J]. 新农业, 2022, 52(21): 43-44.

- [13] 王腾宇, 王詹玲, 李 丹, 等. 茯苓多糖芡实米饼的开发[J]. 黑龙江粮食, 2022, 33(09): 82-85+36.
- [14] Du J, Lu Z, Cheng K, et al. Relationship between starch granule-associated proteins and in vitro digestibility of buckwheat starches: From the perspective of gelatinization degree[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143115.
- [15] Rivero-Ramos P, Railton J, Rodrigo D, et al. High hydrostatic pressure modulates the digestive properties of rice starch-gallic acid composites by boosting non-inclusion complexation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 293: 139257.
- [16] Shuprajhaa T, Paramasivam S K, Subramaniyan P, et al. Ultrasonic assisted enzymolysis based modification of native banana starch - A comprehensive analyses of the structural, morphological, rheological and textural properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139748.
- [17] Wang X, Zhao Q, Li R, et al. Effect of microwave treatment on the structural and physicochemical properties of amylose partially removed sorghum starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140285.
- [18] Abedi E, Sayadi M, Karimzadeh A, et al. Micro N₂-bubble-assisted esterification or crosslinking of corn starch by citric, lactic and malic acid: Facilitating the reaction medium under hydrodynamic cavitation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 303: 140714.
- [19] 黄琳涵, 邓琳煜, 何 欣, 等. 魔芋深加工与食品开发研究进展[J]. 食品安全导刊, 2023, 17(21): 175-178.
- [20] 李姝颖, 朱晨潇, 杜若妍, 等. 白芸豆淀粉的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 22-31.
- [21] 吕晨晨, 白羽嘉, 吴晓菊, 等. 藜麦的膳食纤维提取、抗氧化性及其面团流变性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2024, 47(06): 24-28+31.
- [22] 朱婉榕, 陆德财, 王紫琳, 等. 膨化核桃代餐粉的加工工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 119-122+162.
- [23] 马 娇, 张园园, 马 琴, 等. 低 GI 枸杞杂粮代餐粉的配方优化及其降血糖作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 1-13.
- [24] 米顺利, 竹 烨, 张 艺, 等. 螺旋藻复配代餐粉的研制[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(7): 43-49.

- [25] 王俊楠, 杜梦瑶, 陈晓春, 等. 不同加工方式对黄精杂粮代餐粉特性研究[J]. 农产品加工, 2023, 21(11): 13-15+19.
- [26] 付文军, 刘晓媛, 王 昊, 等. 板栗柚子皮代餐粉的研制及品质分析[J]. 粮食加工, 2023, 48(3): 50-55.
- [27] 谢艳东, 邓晓东, 严 阳, 等. 石斛马铃薯复合代餐粉的工艺优化及体内 GI 值测定[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(2): 83-90.
- [28] 艾 薇, 莫 秀. 以紫薯为基料代餐粉制备工艺的研究[J]. 保山学院学报, 2023, 42(2): 20-26.
- [29] 朱 尧, 李瑜珺, 李高敏, 等. 抹茶代餐粉的工艺探究[J]. 现代食品, 2023, 29(1): 64-66+71.
- [30] 王琼琼, 龙勇益, 何田田, 等. 新疆干果营养能量棒的研制[J]. 轻工科技, 2020, 36(10): 21-25.
- [31] 沈 豪, 陈可为. 能量棒的研究进展[J]. 现代食品, 2018, 4(16): 39-45+48.
- [32] Jung S. Advances in modeling cellular state dynamics: integrating omics data and predictive techniques[J]. Animal Cells and Systems, 2025, 29(1): 72-83.
- [33] Dongare D B, Nishad S S, Mastoli S Y, et al. High-throughput sequencing: a breakthrough in molecular diagnosis for precision medicine[J]. Functional & Integrative Genomics, 2025, 25(1): 22.
- [34] Ni Q, Han G, Pan C. Single-cell transcriptomics reveals an abnormal immune microenvironment in plasma cell mastitis[J]. Annals of Medicine, 2025, 57(1): 2446694.
- [35] Cao H, Tao Y, Jin R, et al. Proteomics reveals the key transcription-related factors mediating obstructive nephropathy in pediatric patients and mice[J]. Renal Failure, 2025, 47(1): 2443032.
- [36] Van M L, Vanden B E, De P E, et al. Metabolomics reveals alterations in gut-derived uremic toxins and tryptophan metabolism in feline chronic kidney disease[J]. Veterinary Quarterly, 2025, 45(1): 1-15.
- [37] Ji J, Zang L, Lu T, et al. Widely targeted metabolomics analysis reveals differences in volatile metabolites among four Angelica species. [J]. Natural Products and Bioprospecting, 2025, 15(1): 2.
- [38] Yu J L, Zhang Z Y, Liu S P, et al. Relationship between metabolomics of T2DM patients and the anti-diabetic effects of Phellodendri Chinensis Cortex-

- Anemarrhenae Rhizoma herb pair in mice[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 339: 119129.
- [39] Chen H, Zhang L, Liu M, et al. Multi-Omics Research on Angina Pectoris: A Novel Perspective[J]. Aging and Disease, 2024, 12: 1298.
- [40] 张 琪, 常 久, 季巍巍, 等. 网络药理学在中医药领域的研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2024, 31(11): 186-190.
- [41] Liu Y, Luo J, Meenu M, et al. Anti-obesity mechanisms elucidation of essential oil components from Artemisiae Argyi Folium (Aiye) by the integration of GC-MS, network pharmacology, and molecular docking[J]. International Journal of Food Properties, 2025, 28(1): 2452445.
- [42] Yi J R, Zeng B, Liu B, et al. Network pharmacology and in vitro experiments reveal the potential therapeutic effects of Scrophularia ningpoensis Hemsl in the treatment of ameloblastoma[J]. Journal of Stomatology Oral and Maxillofacial Surgery, 2025, 126(6): 102146.
- [43] Yi J R, Zeng B, Liu J F, et al. Network pharmacology and experimental validation reveals the potential therapeutic effects of Polygonum cuspidatum against odontogenic keratocyst[J]. Journal of Stomatology Oral and Maxillofacial Surgery, 2025, 126(3): 102105.
- [44] Zhao J, Yang J, Yang F, et al. An integrated zebrafish model and network pharmacology to investigate the mechanism of Chrysanthemum for treating metabolic dysfunction-associated fatty liver disease[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143134.
- [45] Jiang G Z, Ma Z Y, Hou H D, et al. Gastrointestinal motility modulation efficacy-related chemical marker findings and QAMS-based quality control of Agastache rugosa[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2025, 256: 116680.
- [46] Hu H, Huang W, Chen Q, et al. Analysis of potential antidiarrheal lipids in Valeriana jatamansi reveals effects of lipophilic active substances on inflammation[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 226: 120595.
- [47] Chen M, Zhou Y, Yang J, et al. Network pharmacology and molecular docking technology-based predictive study and potential targets analysis of icariin for the treatment of diabetic nephropathy. [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2025, 751: 151434.

- [48] Yan K, Zhang R K, Wang J X, et al. Using network pharmacology and molecular docking technology, proteomics and experiments were used to verify the effect of Yigu decoction (YGD) on the expression of key genes in osteoporotic mice[J]. *Annals of Medicine*, 2025, 57(1): 2449225.
- [49] Li W, Zhu J, Zhou T, et al. Exploring the mechanisms of Yinchenhao decoction against ANIT-induced cholestatic liver injury by lipidomics, metabolomics and network pharmacology[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2025, 258: 116736.
- [50] Geng W, Liu S, Dong H, et al. Exploration of Active Substances and Its Potential Mechanism of Gancao Fuzi Decoction on Inflammatory Based on Metabolomics and Network Pharmacology[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2025, 39(10): e10007.
- [51] Gan A, Chen H, Lin F, et al. Sanzi Yangqin Decoction improved acute lung injury by regulating the TLR2-mediated NF- κ B/NLRP3 signaling pathway and inhibiting the activation of NLRP3 inflammasome[J]. *Phytomedicine*, 2025, 139: 156438.
- [52] Liu A, Zhong M, Han Z, et al. Characterization of Active Compounds in Sanhuang Shu ' ai Decoction for the Management of Ulcerative Colitis: A UHPLC-MS Study[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2025, 39(6): e9976.
- [53] Ong K L, Stafford L K, MCLAUGHLIN S A, et al. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. *The Lancet*, 2023, 402(10397): 203-234.
- [54] Gong Q H, Zhang P, Wang J P, et al. Morbidity and mortality after lifestyle intervention for people with impaired glucose tolerance: 30-year results of the Da Qing diabetes prevention outcome study[J]. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2019, 7(6): 452-461.
- [55] 王盈蕴, 吉红玉, 朱向东. 芡实的临床应用及其用量探究[J]. *吉林中医药*, 2021, 41(5): 664-667.
- [56] 王华昆. 黄精芡实汤联合揠针疗法对轻型糖尿病患者的临床疗效分析[J]. *糖尿病新世界*, 2021, 24(20): 98-100, 104.
- [57] Xu L, Zuo S M, Liu M, et al. Integrated analysis of metabolomics combined with network pharmacology and molecular docking reveals the effects of processing on metabolites of *dendrobium officinale*[J]. *Metabolites*, 2023, 13(8): 886.

- [58] 朱和权, 李 勇, 李春阳等. 基于代谢组学及网络药理学分析天麻熟制过程中生物学活性变化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 29-39.
- [59] Mu Q E, Zhang M X, Li Y, et al. Metabolomic analysis reveals the effect of insecticide chlorpyrifos on rice plant metabolism[J]. *Metabolites*, 2022, 12(12): 1289.
- [60] 张 丽, 曾嘉程, 王 梦, 等. 不同产地芡实的品质特性评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 70-78.
- [61] LIn Y R, Zheng F T, Xiong B J, et al. Koumine alleviates rheumatoid arthritis by regulating macrophage polarization[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 311: 116474.
- [62] Lu J S, Yang L, Chen J, et al. Basolateral amygdala astrocytes modulate diabetic neuropathic pain and may be a potential therapeutic target for koumine[J]. *British Journal of Pharmacology*, 2023, 180(10): 1408-1428.
- [63] Yuan Z H, Yang M R, Liang Z, et al. PI3K/AKT/mTOR, NF- κ B and ERS pathway participated in the attenuation of H₂O₂-induced IPEC-J2 cell injury by koumine[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 304: 116028.
- [64] Xue H, Xing H J, Wang B, et al. Cinchonine, a potential oral small-molecule glucagon-like peptide-1 receptor agonist, lowers blood glucose and ameliorates non-alcoholic steatohepatitis[J]. *Drug Design, Development and Therapy*, 2023, 17: 1417-1432.
- [65] Wang H, Shi Y T, Ma D N, et al. Cinchonine exerts anti-tumor and immunotherapy sensitizing effects in lung cancer by impairing autophagic-lysosomal degradation[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2023, 164: 114980.
- [66] Wang Q L, Wei C M, Weng W, et al. Enhancement of oral bioavailability and hypoglycemic activity of liquiritin-loaded precursor liposome[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, 592: 120036.
- [67] Wang Q L, Zhang K Y, Weng W, et al. Liquiritin-hydroxypropyl-beta-cyclodextrin inclusion complex: preparation, characterization, bioavailability and antitumor activity evaluation[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2022, 111(7): 2083-2092.
- [68] Bai D D, Xiao W H. Regulatory effects and mechanisms of branched chain amino acids and metabolic intermediates on insulin resistance[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2023, 75(2): 291-302.

- [69] Panghal A, Kumar V, Jena G. Melphalan induced germ cell toxicity and dose-dependent effects of β -aminoisobutyric acid in experimental rat model: Role of oxidative stress, inflammation and apoptosis[J]. Journal of Biochemical and Molecular Toxicology, 2023, 37(8): e23374.
- [70] Ghaiad H R, Ali S O, Al-mokaddem A K, et al. Regulation of PKC/TLR-4/NF- κ B signaling by sulbutiamine improves diabetic nephropathy in rats[J]. Chemico-Biological Interactions, 2023, 381: 110544.
- [71] Mrowicka M, Mrowicki J, Dragan G, et al. The importance of thiamine (vitamin B₁) in humans[J]. Bioscience Reports, 2023, 43(10): BSR20230374.
- [72] Moskowitz A, Berg K M, Grossestreuer A V, et al. Thiamine for renal protection in septic shock (TRPSS): a randomized, placebo-controlled trial[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2023, 208(5): 570-578.
- [73] Liang Y D, Dai X L, Cao Y, et al. The neuroprotective and antidiabetic effects of trigonelline: A review of signaling pathways and molecular mechanisms[J]. Biochimie, 2023, 206: 93-104.
- [74] Zia S R, Wasim M, Ahmad S. Unlocking therapeutic potential of trigonelline through molecular docking as a promising approach for treating diverse neurological disorders[J]. Metabolic Brain Disease, 2023, 38(8): 2721-2733.
- [75] Wu Q, Guan Y B, Zhang K J, et al. Tanshinone IIA mediates protection from diabetes kidney disease by inhibiting oxidative stress induced pyroptosis[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 316: 116667.
- [76] Si J C, Liu B B, Qi K R, et al. Tanshinone IIA inhibited intermittent hypoxia induced neuronal injury through promoting autophagy via AMPK-mTOR signaling pathway[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 315: 116677.
- [77] Zhang W W, Liu M H, Ji Y R, et al. Tanshinone IIA inhibits endometrial carcinoma growth through the MAPK/ERK/TRIB3 pathway[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2023, 743: 109655.
- [78] Amin M M, Arbid M S. Estimation of ellagic acid and/or repaglinide effects on insulin signaling, oxidative stress, and inflammatory mediators of liver, pancreas, adipose tissue, and brain in insulin resistant/type 2 diabetic rats[J]. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 2017, 42(2): 181-192.
- [79] Lu G Y, Wang X Z, Cheng M, et al. The multifaceted mechanisms of ellagic acid in the treatment of tumors: state-of-the-art[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy,

- 2023, 165: 115132.
- [80] Szkudelska K, Szkudelski T. The anti-diabetic potential of betaine. Mechanisms of action in rodent models of type 2 diabetes[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2022, 150: 112946.
- [81] Zhang Y, Jia J P. Betaine mitigates amyloid- β -associated neuroinflammation by suppressing the NLRP3 and NF- κ B signaling pathways in microglial cells[J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2023, 94(S1): S9-S19.
- [82] Zheng L, Lee J, Yue L M, et al. Inhibitory effect of pyrogallol on α -glucosidase: Integrating docking simulations with inhibition kinetics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 686-693.
- [83] Ozturk S S B. Acetylcholinesterase inhibitory potential and antioxidant properties of pyrogallol[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2015, 30(5): 761-766.
- [84] Patel D K, Patel K. Therapeutic importance of eriodictyol in the medicine for the treatment of diabetes and associated complication through its insulin secretagogue properties[J]. Metabolism-Clinical and Experimental, 2022, 128: 155056.
- [85] Azizi S, Mahdavi R, VAGHEF-MEHRABANY E, et al. Potential roles of citrulline and watermelon extract on metabolic and inflammatory variables in diabetes mellitus, current evidence and future directions: a systematic review[J]. Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology, 2020, 47(2): 187-198.
- [86] Ivanovski N, Wang H, Tran H, et al. L-citrulline attenuates lipopolysaccharide-induced inflammatory lung injury in neonatal rats[J]. Pediatric Research, 2023, 94(5): 1684-1695.
- [87] Park H Y, Kim S W, Seo J, et al. Dietary arginine and citrulline supplements for cardiovascular health and athletic performance: a narrative review[J]. Nutrients, 2023, 15(5): 1268.
- [88] Lin P B, Zhang X J, Zhu B Y, et al. Naringenin protects pancreatic β cells in diabetic rat through activation of estrogen receptor β [J]. European Journal of Pharmacology, 2023, 960: 176115.
- [89] Cai J, Wen H L, Zhou H, et al. Naringenin: a flavanone with anti-inflammatory and anti-infective properties[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 164: 114990.
- [90] Punithavathi V R, Prince P S M, Kumar R, et al. Antihyperglycaemic, antilipid

- peroxidative and antioxidant effects of gallic acid on streptozotocin induced diabetic Wistar rats[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2011, 650(1): 465-471.
- [91] Jang J H, Park J E, Han J S. Scopoletin inhibits α -glucosidase in vitro and alleviates postprandial hyperglycemia in mice with diabetes[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2018, 834: 152-156.
- [92] Lee S G, Kim M M. Anti-inflammatory effect of scopoletin in RAW264. 7 macrophages[J]. *Journal of Life Science*, 2015, 25(12): 1377-1383.
- [93] 陈吉刚, 庞琦, 曾薇等. 甜菜碱对糖尿病肾病小鼠的治疗作用及其机制[J]. *第三军医大学学报*, 2012, 34(11): 1040-1043.
- [94] Jeong H, Mason S P, Barabási A L, et al. Lethality and centrality in protein networks[J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 41-42.
- [95] 芦宇婷, 周仙杰, 雷雨, 等. 白芸豆提取物联合左旋肉碱对肥胖小鼠的减脂作用[J]. *卫生研究*, 2022, 51(6): 1015-1018.
- [96] 李焕, 邓浩, 刘晃, 等. 左旋肉碱虾青素复合营养素治疗特发性少精子症和弱精子症的多中心临床观察[J]. *中华男科学杂志*, 2021, 27(4): 334-339.
- [97] 张梦洁, 郭垚辉, 任彬, 等. 乙酰左旋肉碱对大鼠脊髓损伤保护作用的实验研究[J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2020, 23(17): 1479-1483.
- [98] Jiang Y, Pei J, Zheng Y, et al. Gallic acid: a potential anti-cancer agent[J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, 2022, 28(7): 661-671.
- [99] Bhattacharyya S, Ahammed S M, Saha B P, et al. The gallic acid-phospholipid complex improved the antioxidant potential of gallic acid by enhancing its bioavailability[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2013, 14(3): 1025-1033.
- [100] Lin W L, Wang C J, Tsai Y Y, et al. Inhibitory effect of esculetin on oxidative damage induced by t-butyl hydroperoxide in rat liver[J]. *Archives of Toxicology*, 2000, 74(8): 467-472.
- [101] Wang K, Zhang Y, Ekunwe S I N, et al. Antioxidant activity and inhibition effect on the growth of human colon carcinoma (HT-29) cells of esculetin from *Cortex Fraxini*[J]. *Medicinal Chemistry Research*, 2011, 20(7): 968-974.
- [102] Kanitsoraphan C, Rattanawong P, Charoensri S, et al. Trimethylamine N-Oxide and risk of cardiovascular disease and mortality[J]. *Current Nutrition Reports*, 2018, 7(4): 207-213.
- [103] 陈艳, 许丽丽, 王丽曼, 等. 血浆三甲胺 N-氧化物与心肌梗死关系的研究进展[J]. *医药导报*, 2023, 42(4): 524-528.

- [104] 赵霄潇, 颜红兵. 三甲胺-*N*-氧化物在心血管相关疾病发病机制中的研究进展[J]. 心血管病学进展, 2020, 41(11): 1123-1125+1136.
- [105] Liu Y W, Wang L J, Li X K, et al. Tanshinone IIA improves impaired nerve functions in experimental diabetic rats[J]. Biochemical And Biophysical Research Communications, 2010, 399(1): 49-54.
- [106] Zhang Y, Zhang L, Zhang Y, et al. The protective role of liquiritin in high fructose-induced myocardial fibrosis via inhibiting NF- κ B and MAPK signaling pathway[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2016, 84: 1337-1349.
- [107] Abdel-moneim A, Abd E S M, Yousef A I, et al. Modulation of hyperglycemia and dyslipidemia in experimental type 2 diabetes by gallic acid and p-coumaric acid: the role of adipocytokines and PPAR γ [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018, 105: 1091-1097.
- [108] Mustafa H A, Albkrye A M S, Abdalla B M, et al. Computational determination of human PPARG gene: SNPs and prediction of their effect on protein functions of diabetic patients[J]. Clinical and Translational Medicine, 2020, 9(1): 7.
- [109] Demir T, Onay H, Savage D B, et al. Familial partial lipodystrophy linked to a novel peroxisome proliferator activator receptor - γ (PPARG) mutation, H449L: a comparison of people with this mutation and those with classic codon 482 Lamin A/C (LMNA) mutations[J]. Diabetic Medicine, 2016, 33(10): 1445-1450.
- [110] Lyssenko V, Almgren P, Anevski D, et al. Genetic prediction of future type 2 diabetes. [J]. PLOS Medicine, 2005, 2(12): e345.
- [111] 张素敏, 崔 艳, 王晓闻. 黄米抗性淀粉的压热法制备及其添加量对饼干质构和 GI 值的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(06): 219-225.
- [112] 石彦国, 谢文健, 郑欣茹, 等. 超声改性对淀粉理化性质的影响及其在食品中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 1-10.
- [113] 张楚佳, 窦博鑫, 高 嫚, 等. 物理法制备 RS3 型抗性淀粉的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 425-433.
- [114] 俞安珍. RS3 型芡实抗性淀粉的制备及其体外消化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
- [115] 陈坤林, 黄明珠, 李 祥, 等. 挤压膨化处理对芡实速溶粉理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 259-266.
- [116] 陈坤林, 李 祥, 何思思, 等. 响应面法优化芡实粉复合酶酶解工艺及多糖抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 20-27.

- [117] Wang L D, Li X Q, Gao F, et al. Effects of jet milling pretreatment and esterification with octenyl succinic anhydride on physicochemical properties of corn starch[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2893.
- [118] Liu Z, Liu X, Yu J, et al. Novel approach for quantitative characterization of short-range molecular order in gelatinized starch by x-ray diffraction[J]. *Biomacromolecules*, 2023, 24(3): 1267-1273.
- [119] Yang S Q, Chen L M, Xiong R Y, et al. Long-term straw return improves cooked indica rice texture by altering starch structural, physicochemical properties in South China[J]. *Food Chemistry-x*, 2023, 20: 100965.
- [120] 刘云芬, 郭珍红, 殷菲彤, 等. 响应面优化微波-压热法制备马蹄抗性淀粉的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(21): 74-82.
- [121] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992 Oct, 46 Suppl 2: S33-50.
- [122] Li J, Han W, Zhang B, et al. Structure and physicochemical properties of resistant starch prepared by autoclaving-microwave[J]. *Starch-Stärke*, 2018, 70(9-10): 1800060.
- [123] 李明娟, 王颖, 张雅媛, 等. 5种干燥方式对木薯酸淀粉性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(8): 134-142.
- [124] 杨玥熹, 曹一丹, 俞安珍, 等. RS3型芡实抗性淀粉的制备及纯化工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 69-76.
- [125] Wang D L, Hou F R, Ma X B, et al. Study on the mechanism of ultrasound-accelerated enzymatic hydrolysis of starch: Analysis of ultrasound effect on different objects[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 148: 493-500.
- [126] 吕艺扬. 响应面优化羧甲基醚化法制备马蹄抗性淀粉的工艺及理化性质研究[J]. *现代食品*, 2024, 30(1): 57-64.
- [127] Han Z, Li Y, Luo D H, et al. Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129887.
- [128] 蔡文, 帅良, 廖玲燕, 等. 压热辅助酶解法制备马蹄抗性淀粉的工艺优化及理化特性研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(7): 234-242.
- [129] 王新智, 王天池, 吴玉柱, 等. 微波间歇干燥对玉米籽粒中淀粉理化特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(2): 179-190.

- [130] 王 艳, 刘洪芹, 孙立瑞, 等. 物理场影响淀粉消化特性的作用机制研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(07): 215-224.
- [131] 廖雪勤, 汪 楠, 胡 荣, 等. 超声处理时间对莲藕淀粉理化和结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 183-191.
- [132] Nakajima S, Horiuchi S, Ikehata A, et al. Determination of starch crystallinity with the Fourier-transform terahertz spectrometer[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 262: 117928.
- [133] Ma Y, Xu D, Sang S, et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106362.
- [134] Yang Y X, Chen Q, Yu A Z, et al. Study on structural characterization, physicochemical properties and digestive properties of euryale ferox resistant starch[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129924.
- [135] 刘 燕, 王璐颖, 郑晓卫, 等. 山药交联淀粉的制备与表征[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 22-30.
- [136] 张淑仪, 许 祥, 张林华, 等. 高直链玉米淀粉添加对挤压荞麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 116-124.
- [137] Lubowa M, Yeoh S Y, Easa A M. Textural and physical properties of retort processed rice noodles: Influence of chilling and partial substitution of rice flour with pregelatinized high-amylose maize starch[J]. Food Science and Technology International, 2018, 24(6): 476-486.
- [138] 李彩妮, 安凤平, 石 娟, 等. 超声冻融-复合酶解制备小麦多孔淀粉及其吸附特性[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(6): 106-112.
- [139] 武云娇, 王一飞, 魏明智, 等. 微波复合酶解改性对小米淀粉结构表征及其理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(11): 44-51.
- [140] Zhang Y Y, Li G P, Wu Y W, et al. Influence of amylose on the pasting and gel texture properties of chestnut starch during thermal processing[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 378-383.
- [141] 董志雄. 基于 RS2 型抗性淀粉和苦荞的低 GI 米线配方研制[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
- [142] 刘俐彤, 钟俊麟, 赵存朝, 等. 响应面优化辣木核桃蛋白能量棒配方[J]. 食品工业, 2022, 43(01): 144-148.
- [143] 刘露露. 坚果能量棒的研制[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 170-173.

- [144] 王小敏, 骆津津, 张娜郡, 等. 高膳食纤维谷物代餐粉的制备及其品质特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(18): 132-140.
- [145] Ge X, Shen H, Su C, et al. The improving effects of cold plasma on multi-scale structure, physicochemical and digestive properties of dry heated red adzuki bean starch[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129159.
- [146] Shen H, Ge X, Zhang B, et al. Understanding the multi-scale structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of citrate naked barley starch induced by non-thermal plasma[J]. Food & Function, 2021, 12(17): 8169-8180.
- [147] 杨舒贝, 何晓伟. 芡实鲜切面条制备工艺[J]. 食品工业, 2022, 43(04): 112-116.
- [148] 姜 丰, 龚盛祥, 王晨曦, 等. 黑全麦粉品质分析及黑全麦面条的研制[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(02): 99-107.
- [149] 周育媛, 顾龙建, 刘懂勋, 等. 黄茶曲奇饼干配方优化[J]. 现代食品, 2024, 30(16): 136-140.
- [150] 吕培楷, 秦 勇, 汪雅馨. 板栗燕麦曲奇饼干的研制及品质分析[J]. 发酵科技通讯, 2024, 53(04): 216-221.
- [151] 尹忠平, 张 丽, 陈继光, 等. 一种用于餐后血糖控制的芡实提取物、制备方法及应用[P]. 中国专利: CN110090243B, 2021-07-30.
- [152] 李多伟, 刘长霞. 白芸豆 α -淀粉酶抑制剂的提取分离方法[P]. 中国专利: CN104770737A, 2015-07-15.
- [153] Wang K, Ge Y, Jia Y, et al. Effect of exogenous protein crosslinking on the physicochemical properties and in vitro digestibility of corn starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 357: 123428.
- [154] Shi H, Qin M L, Liu Q Y, et al. The vine tea flavonoids extraction by ultrasound-enzyme-assisted and its consequences for antioxidant efficacy and gut microbiota in rats[J]. Food and Agricultural Immunology, 2025, 36(1): 2470131.
- [155] Zheng W, Yuan Q, Zhang A, et al. Data augmentation of flavor information for electronic nose and electronic tongue: An olfactory-taste synesthesia model combined with multiblock reconstruction method[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 272: 126810.
- [156] 范东翠, 邱丽青, 陈晶晶, 等. 魔芋果蔬健康代餐粉的功能特性[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(03): 85-93.

- [157] 李佳玲, 李佳蔚, 曾 珊, 等. 不同脱腥处理对牡蛎酶解产物风味特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(04): 254-263.
- [158] Duskun B, Kutlu G, Akman P K, et al. Formulation of Fiber-Enriched Crackers with Oleaster Powder: Effect on Functional, Textural, and Sensory Attributes[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2025, 80(1): 82.
- [159] 梁二宏, 赵 燕, 闵成军, 等. 梯度升温杀菌和高温杀菌对番茄炖牛腩品质差异分析[J]. 食品科学, 1-16[2025-03-11].
- [160] 刘月瑶, 路 飞, 高雨晴, 等. 藜麦的营养价值、功能特性及其制品研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(05): 56-65.
- [161] 唐 荣, 黄保国, 孙卫邦, 等. 金沙江干热河谷特有植物白魔芋的传粉生物学研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(04): 458-466.
- [162] 马金鸽, 王进英, 冶梓芩, 等. 油菜籽蛋白青稞饼干的制备及其品质评价[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(12): 122-127.
- [163] 王金秋, 李柯萌, 何睿琳, 等. 蛋清蛋白棒制备工艺及其质构特性研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(03): 273-277.
- [164] 秦皖雪, 钟海霞, 张付春, 等. 不同砧木对‘克瑞森无核’葡萄酚类物质含量及其合成相关酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2025, 34(02): 271-279.

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 张青强,马佳佳,朱和权,等.基于代谢组学及网络药理学分析不同品种芡实中活性成分及其对人糖尿病的作用[J].江苏农业学报,2024,40(11):2163-2176.

致谢

硕士阶段经历了多个单位，多个地点，研一在安徽工程大学学习理论知识，研二在江苏省农业科学院做实验以及写作，研三在苏州市农业科学院进行实验和写作。本论文的顺利完成，离不开诸多师友的关心和帮助。

首先，也是最重要的，我要向我的导师李春阳致以最崇高的敬意和最衷心的感谢。李老师严谨的治学态度、深厚的学术造诣和高尚的人格魅力深深地影响了我。从论文选题、开题报告，到研究过程的方案设计、数据分析，再到论文的撰写和反复修改，李老师始终给予我悉心指导和殷切关怀。在我遇到困难和困惑时，您总能耐心点拨，指引我找到解决问题的方法。您的教诲不仅教会我做学问，更教会我如何做人。没有李老师的倾力指导和严格要求，本论文不可能顺利完成，我的科研能力和学术视野也难以取得如此大的进步。在此，再次向您表示衷心的感谢！

其次感谢研一期期间的蔡为荣教授，为我提供了联培机会，从而更加扩展了视野。感谢研一阶段的室友朱司宝、姜心豪、杨健平，在一块度过了欢快的研一时光。感谢研二期期间的同门刘欢，在研二期间相互讨论实验进程以及相互鼓励进步。感谢研三期间的马佳佳老师为我提供了便捷的实验室环境，能让我安心的做实验。

最重要的是感谢我的母亲对我的支持和鼓励，使我能够完成我的学业。

最后，再次感谢所有关心、帮助和支持过我的人。本论文的完成，离不开你们的帮助。未来的人生道路上，我将带着这份感恩之心，继续努力前行。