

分类号: Q81

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220510102

竹笋壳可溶性膳食纤维提取及其结构与性能研究
EXTRACTION OF SOLUBLE DIETARY FIBER
FROM BAMBOO SHOOT SHELLS, AND STUDY OF
IT IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES

论文作者: 王雨

指导导师: 聂光军教授

专 业: 生物工程

研究方向: 生物质资源化与环境生物治理

论文答辩日期: 2025 年 5 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：王雨

日期：2025 年 5 月 15 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：王雨 指导教师签名：夏志军

日期：2025 年 5 月 15 日 日期：2025 年 5 月 15 日

竹笋壳可溶性膳食纤维提取及其结构与性能研究

摘 要

我国竹子资源丰富，竹笋加工产生的大量竹笋壳，富含膳食纤维等多种资源成分，但未得到充分利用，造成资源浪费与环境污染。本研究旨在将竹笋壳转化为可溶性膳食纤维，研究其结构与性能，并且进一步探索多种分离方法的耦合机制。探究其在食品及其包装领域的应用前景，充分挖掘竹笋壳资源化价值。

(1) 提取方法的探索：以竹笋壳为原料，采用蒸汽爆破法(Steam explosion, SE)、碱法(Alkaline extraction, AE)、微生物法(Microbiological extraction, ME)以及物理-化学-微生物发酵法联合处理。通过优化各方法参数、微生物发酵培养基等，比较单一方法水提、酸提、碱提以及联合法(微生物发酵一步法和两步法)，结果发现单一碱法提所得可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)产率最高，9%。联合法中两步法 SDF 的产率最高为 15%；基于此进行单一方法的参数优化可得 SE 在 0.8 MPa、3 min 条件下 SDF 产量最高，AE 在 1 mol/L、1.5 h 条件下 SDF 产量最高，两步法中以气爆-碱法处理后的不可溶性膳食纤维为底物，并且在氮源含量为 6%的条件下进行乳酸菌发酵可实现最高产量为 28.28%。进一步分析不同处理对 SDF 性能的影响。通过测定 SDF 的持水能力(Water holding capacity, WHC)、持油能力(Oil-holding capacity, OHC)、溶解度(Solubility)等性能，

结果发现：SE 在 0.8 MPa、3 min 条件下，WHC 为 2.67 g/g，OHC 为 4.44 g/g，AE 在 1 mol/L、1.5 h 条件下 WHC 为 3.03 g/g，OHC 为 4.67 g/g；相较于未优化时性能都有明显的变化。

(2) 多方法耦合机制的研究：利用扫描电子显微镜 (Scanning electron microscopy, SEM)、傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 和 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 等手段对 SDF 进行结构表征；通过比较 SDF 的 WHC、OHC、抗氧化能力等性能同时监测微生物发酵过程中 pH、蛋白含量、酶活性等参数的变化，探索结构与性能以及多方法耦合机制。结果发现：不同提取方法改变了 SDF 的微观结构、结晶度和热稳定性。SE、AE 和 ME 联合使用破坏了 BSS 结构，增加 SDF 产量的同时减小了其尺寸；SDF 的 OHC、WHC、葡萄糖吸附能力 (Glucose adsorption capacity, GAC) 和抗氧化能力在不同处理下存在差异，联合处理在这些性能上表现出较高的累积吸附能力。由此可推测上述多种分离方法存在明显的耦合机制，即 SE 破坏外层木质素，促进 AE 水解木质素和半纤维素，形成利于微生物利用的结构；微生物发酵产生的酶和有机酸进一步降解 IDF，提高 SDF 产量，且释放的内含物增强了 SDF 的抗氧化能力。

上述研究明确了多种方法联合使用对提高竹笋壳 SDF 产量和性能的显著效果，协同机制的揭示为其他 SDF 分离提取提供了理论依据，也为资源化开发高纤维含量的农林废弃物提供了方法路径。

关键词：竹笋壳，可溶性膳食纤维，蒸汽爆破法，碱性萃取法，微生物提取法

EXTRACTION OF SOLUBLE DIETARY FIBER FROM BAMBOO SHOOT SHELLS, AND STUDY OF IT IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES

ABSTRACT

China has abundant bamboo resources. With the development of bamboo shoot processing, more and more underutilized shoot shells have been made. The shells are rich in dietary fiber and other bioactive components, but cannot be utilized, leading to resource waste and environmental pollution. This study aimed to convert bamboo shoot shells (BSS) into soluble dietary fiber (SDF), investigate its structural and functional properties, and elucidate the coupling mechanisms of combined separation methods, thereby exploring its potential applications in food and packaging industries to maximize resource utilization.

(1) Optimization of extraction methodologies: BSS were treated via steam explosion (SE), alkaline extraction (AE), microbiological extraction (ME), and combined physical-chemical-microbial fermentation approaches, respectively. Many parameters of individual methods (water, acid, or alkaline extraction) and combined strategies (one-step or two-step

microbial fermentation) were systematically optimized. The results demonstrated that AE achieved the highest SDF yield (9%), while the two-step method in the combined method (combining SE, AE, and ME) maximized SDF production (28.28%). Specifically, the optimal conditions were determined as SE at 0.8 MPa for 3 min, AE with 1 mol/L alkali for 1.5 h, and nitrogen source supplementation (6%) during lactic acid bacteria fermentation. Functional analyses revealed significant variations in SDF properties: water-holding capacity (WHC), oil-holding capacity (OHC), solubility, and glucose adsorption capacity (GAC) were critically influenced by extraction methods. The results showed that the WHC and OHC were 2.67 g/g and 4.44 g/g for SE at 0.8 MPa and 3 min, The WHC and OHC of AE were 3.03 g/g and 4.67 g/g at 1 mol/L and 1.5 h, compared with the performance when it is not optimized, there is a significant change.

(2) Elucidation of multi-method coupling mechanisms: The structural characterization was carried out via scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD). Furthermore, the properties of SDF, such as WHC, OHC, and antioxidant capacity, were determined and comparatively analyzed. The variations in many parameters like pH, protein content, and enzyme activity during microbial fermentation were monitored. From this, it was found to explore the relationship between structure and performance, as well as the mechanisms of multi-method coupling. The results showed that

the combined method synergistically modified the microstructure, crystallinity, and thermal stability of SDF. SE disrupted the outer lignin layer, facilitating AE-mediated hydrolysis of lignin and hemicellulose, thereby generating substrates amenable to microbial degradation. Subsequent microbial fermentation via enzymatic and organic acid activity further decomposed insoluble dietary fiber (IDF), increasing SDF yield and releasing antioxidant-rich compounds.

This study highlights the efficacy of the combined strategy in boosting SDF yield (28.28%) and functional performance from BSS. The revealed synergistic mechanisms provide a theoretical foundation for SDF extraction from lignocellulosic biomass and establish a scalable methodology for valorizing agricultural waste into high-fiber functional materials, advancing sustainable resource utilization in food and packaging sectors.

KEY WORDS: Bamboo shoot shell, Soluble dietary fiber, Steam explosion method, Alkaline extraction method, Microbial extraction method

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
目录.....	i
第 1 章 绪论.....	1
1.1 竹笋壳简介.....	1
1.1.1 竹笋壳的应用限制及研究现状.....	1
1.1.2 膳食纤维概况.....	2
1.2 立题依据.....	9
1.3 主要研究内容.....	10
第 2 章 竹笋壳 SDF 提取工艺探索及其性质研究	12
2.1 前言.....	12
2.2 材料与仪器设备.....	13
2.2.1 材料.....	13
2.2.2 主要试剂.....	13
2.2.3 主要仪器.....	14
2.2.4 培养基.....	14
2.3 实验内容与方法.....	15
2.3.1 竹笋壳粉的制备.....	15
2.3.2 <i>Bacillus subtilis natto</i> 的斜面培养及活化.....	15
2.3.3 LAB 培养及活化.....	15
2.3.4 不同化学-微生物联合处理条件对 SDF 提取率的优化.....	15
2.3.5 蒸汽爆破法(Steam explosion ,SE)优化.....	17
2.3.6 碱萃取(Alkaline extraction ,AE)参数的优化.....	17
2.3.7 两步法-微生物发酵优化	17
2.3.8 SDF 产率	18
2.4 性能测定.....	18
2.4.1 持水能力 (WHC)	18
2.4.2 持油能力 (OHC)	18
2.4.3 溶解度 (Solubility)	18
2.5 结果与讨论.....	19
2.5.1 不同方法对 SDF 提取的影响	19
2.5.2 气爆法优化.....	20
2.5.3 碱提法优化.....	21
2.5.4 微生物发酵提取方法研究.....	22
2.5.5 不同方法对 SDF 性能的影响研究	25
2.6 本章小结.....	27
第 3 章 蒸汽爆破-碱法-微生物法提取竹笋壳 SDF 及性能改良方面的耦合作用研究.....	29
3.1 前言.....	29

3.2 材料与仪器设备.....	30
3.2.1 材料.....	30
3.2.2 主要试剂.....	30
3.2.3 主要仪器.....	31
3.3 实验内容与方法.....	31
3.3.1 BSS 预处理	31
3.3.2 水溶性 SDF (W-SDF) 的制备	32
3.3.3 碱性溶解 SDF (A-SDF) 的制备.....	32
3.3.4 蒸汽爆破/碱性溶解 SDF (SA-SDF) 的制备	32
3.3.5 蒸汽爆破/碱溶/微生物发酵联合使用制备 SDF (SAM-SDF)	32
3.3.6 SDF 产量的测定	32
3.4 微生物发酵.....	33
3.4.1 pH 变化.....	33
3.4.2 蛋白质含量和蛋白酶活性.....	33
3.4.3 纤维素酶活性.....	33
3.5 SDF 的表征	34
3.5.1 溶解度.....	34
3.5.2 流变学测定.....	34
3.5.3 扫描电子显微镜 (SEM)	34
3.5.4 傅里叶变换红外光谱 (FTIR)	34
3.5.5 X 射线衍射 (XRD)	35
3.5.6 TGA 检测	35
3.6 SDF 性能	35
3.6.1 持水能力 (WHC)	35
3.6.2 持油能力 (OHC)	35
3.6.3 葡萄糖吸附能力 (GAC)	35
3.6.4 抗氧化能力.....	36
3.6.5 总酚含量的测定.....	36
3.6.6 总黄酮含量的测定.....	36
3.7 结果与讨论.....	37
3.7.1 BSS-SDF 产量演变过程.....	37
3.7.2 BSS-SDF 的结构演变.....	38
3.7.3 BSS-SDF 性能演变.....	41
3.7.4 微生物发酵过程参数变化.....	43
3.8 多方法耦合机制解析.....	47
3.9 本章小结.....	48
第 4 章结论与展望.....	50
4.1 结论.....	50
4.2 展望.....	50
参考文献.....	52
在校期间发表论文、专利、获奖情况.....	67
致谢.....	68

第1章 绪论

1.1 竹笋壳简介

竹笋壳（Bamboo shoot shells, BSS）是竹笋加工过程中产生的一种质地坚韧、颜色多呈棕褐色或浅黄色的副产品。竹子是纤维素的来源之一，产量高，生长周期短。竹制品越来越多地被用作木材替代品^[1]。中国竹资源丰富，竹笋壳产量高，其中毛竹丛面积 1323.6 万亩，占竹林总面积的 88.8%^[2,3]。我国竹子资源丰富，但是在竹笋加工过程中，只有嫩尖用于食用，而占竹子植物 70%以上的大部分竹笋残留物通常作为废物丢弃，导致资源效率低下和环境污染^[4]。

由于竹笋壳主要由纤维素、半纤维素、木质素和果胶组成^[5]，具有大量潜在的金属结合位点，如羟基、羧基和酚羟基^[6]。这些独特的特性为许多潜在的应用提供了巨大的前景。竹笋壳是多种营养成分与生物活性物质的优质来源^[7]。其中，膳食纤维是竹笋壳的主要成分，约占竹笋壳干重的相当比例，这与豆渣中膳食纤维的主导地位类似，对人体肠道健康具有重要意义，可促进肠道蠕动，预防便秘等肠道疾病。竹笋壳中也含有一定量的蛋白质^[8]，尽管因竹笋品种、生长地域、种植方式等因素影响，蛋白质含量有所波动，但仍不失为潜在的蛋白质获取途径。其脂肪含量在一定范围内，所含的某些脂类物质可能具备调节人体生理机能的功效。此外，竹笋壳富含钾、钙、镁等多种矿物质，这些矿物质易被人体吸收，对维持人体正常生理代谢起着关键作用^[9]。同时，竹笋壳内还含有多种维生素^[10]，在人体新陈代谢等生理过程中发挥着不可或缺的作用。除上述常见成分外，竹笋壳或许还含有黄酮类、多糖类等其他生物活性成分^[11]，这些成分具有抗氧化、抗炎等^[12,13]潜在功效，有待深入研究与开发利用。目前竹笋壳相关产业正逐步兴起，在食品、医药、农业等领域的应用^[14]研究不断深入拓展，预计在未来几年，随着技术的进步与市场需求的不断增长，竹笋壳的应用范围将进一步扩大，其市场规模有望呈现显著的增长态势。

1.1.1 竹笋壳的应用限制及研究现状

竹笋壳虽富含多种有益成分，但其在实际应用中存在诸多限制。竹笋壳水分

含量较高^[15]，在自然环境下易受潮霉变，导致其保存期限较短，不利于长时间储存与远距离运输^[16]。同时，竹笋壳本身具有特殊气味，且质地粗糙，这在一定程度上限制了其在食品、日用品等对感官品质要求较高领域的应用。目前，竹笋壳的利用多集中在一些低附加值方向，如部分地区将其简单作为燃料使用，或直接丢弃在田间地头，不仅造成资源浪费，还可能引发环境污染问题^[17]。在少数应用场景中，竹笋壳被用于制作简易的手工艺品，或作为花卉栽培的覆盖物，但整体利用程度较低，尚未充分挖掘其潜在价值。

为提升竹笋壳的利用率，科研人员展开了一系列研究。在加工处理技术方面，有研究尝试通过特殊的干燥工艺，降低竹笋壳的水分含量，提升其储存稳定性。例如，采用真空冷冻干燥技术，可在最大程度保留竹笋壳营养成分与结构的同时，有效减少水分，延长保存时间。在成分提取与应用拓展上，部分研究聚焦于从竹笋壳中高效提取膳食纤维、黄酮类等生物活性成分。有文献报道，运用酶解法可显著提高竹笋壳膳食纤维的提取率^[18]，且提取出的膳食纤维在功能特性上更具优势，可应用于功能性食品的开发。还有研究通过微生物发酵技术，利用特定菌种对竹笋壳进行发酵处理，不仅能改善其气味与质地，还可提高其中生物活性物质的含量与活性。如利用酵母菌发酵竹笋壳^[19]，发酵产物中的抗氧化物质含量明显增加，有望开发为具有抗氧化功效的健康产品。此外，在材料领域，科研人员尝试将竹笋壳纤维与其他材料复合，制备新型复合材料^[20]。有研究将竹笋壳纤维与可降解塑料复合^[21]，制成的材料在保持一定力学性能的同时，提高了塑料的可降解性，为解决塑料污染问题提供了新思路。

1.1.2 膳食纤维概况

1.1.2.1 膳食纤维的定义

膳食纤维这一概念自提出以来，其定义随着科研的深入不断演变。1953 年，Hipsley^[22]首次提出“膳食纤维 (Dietary Fiber, DF)”这一说法，并将其视作植物细胞壁中不可消化的部分，当时其范畴仅涵盖纤维素、半纤维素和木质素。

到了 1972 年，Trowell 等^[23]将 DF 定义为对人体酶的消化具有抗性的植物多糖和木质素，这些成分具有对抗代谢疾病和结肠疾病等生理作用。1976 年，膳食纤维的定义进一步拓展，包括了抗消化的多糖，像胶质、改性纤维素、低聚寡糖和果胶等，此时着重强调了其可食性与抗消化性。1992-1993 年，一项涉及 147

位专家的国际调查显示,65%的科学家支持将膳食纤维定义为抗人类消化道酶的植物残渣,包括多聚糖、木质素及一些相关成分;59%的科学家赞成把抗消化的低聚糖也归入其中。1999年11月2日,在84届美国谷物化学师协会年会上,膳食纤维被定义为不被人体内源酶消化吸收的可食用植物细胞、多糖、木质素以及相关物质的总和,主要包含纤维素、半纤维素、木质素、果胶等。2001年,美国谷物化学学会(AACC)成立的膳食纤维专门委员会从生理学角度出发^[24],给出相对权威的定义:即在人体大肠中完全或部分发酵而在小肠中抵抗消化和吸收的植物或类似碳水化合物的可食用部分,涵盖多糖、寡糖、纤维素、半纤维素、果胶、树胶、木质素等,该定义明确限定膳食纤维为可食的植物成分。不过,也有科学家鉴于“不被人体消化的物质”这一特性,在AACC定义基础上,将部分存在于动物体、微生物体内及人工合成或半合成的抗消化物质,膳食纤维的定义也在不断完善,以便更精准地反映其本质特征与生理功能。

1.1.2.2 膳食纤维的种类

膳食纤维来源广泛,按来源可分为植物类、动物类和微生物类。植物类膳食纤维常见于谷物、蔬菜、水果等,如麦麸含纤维素与半纤维素,苹果含果胶^[25];动物类以虾蟹外壳提取的壳聚糖为代表,有良好生物相容性与吸附性;微生物类如酵母细胞壁的 β -葡聚糖,具备免疫调节功能。

DF常根据溶解性分为不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF),这是最主要的分类方式。

(1) 不溶性膳食纤维

不溶性膳食纤维指在人体小肠内无法被消化,在结肠中也难以被酵解的一类不溶于水的非淀粉多糖。它主要包含纤维素、半纤维素和木质素等成分,在人体健康维护中扮演着重要角色。

纤维素是由 β -D-葡萄糖单元经 β -1,4-糖苷键连接而成的线性多晶型物。其分子结构呈直链状,众多葡萄糖单元整齐排列,赋予纤维素高度的结晶性与稳定性^[26-28]。纤维素分子间通过氢键相互作用,形成微纤维结构,进而构成植物细胞壁的主要框架。从对人体作用角度,由于人体缺乏能水解 β -1,4-糖苷键的酶,纤维素无法被消化吸收,却能以完整的物理形态增加粪便体积,机械性地刺激肠壁,促进肠道蠕动,助力排便过程,对预防和缓解便秘功效显著^[29]。

半纤维素是一类结构复杂的非淀粉天然多糖，由木聚糖、木葡聚糖、甘露聚糖以及阿拉伯木聚糖等多种不同类型的单糖构成异质多聚体^[30]。与纤维素相比，半纤维素结构相对疏松且具有分支，它紧密结合在纤维素微纤维的表面，并通过自身相互连接，共同构建起植物细胞壁内坚硬且相互连通的网络结构。发酵产生的短链脂肪酸，如乙酸、丙酸和丁酸等，可降低结肠内 pH 值，营造不利于有害致病菌生长的环境，同时促进益生菌的增殖，维护肠道微生态平衡。

不溶性膳食纤维的另一个重要成分木质素主要由碳（C）、氢（H）和氧（O）三种元素组成。它还可能含有少量的氮（N）和硫（S），具体取决于来源和提取方法^[31]。木质素与纤维素和半纤维素紧密络合，是由三个苯丙烷单元通过醚和 C-C 键互连形成的具有三维网络结构的生物聚合物；此外，它还富含芳香环结构、脂肪族和芳香族羟基、醌基团和其他反应性基团^[32]。在植物木质部中，木质素大量存在，它与纤维素、半纤维素协同作用，极大增强了植物组织的机械强度与抗微生物侵蚀能力。此外，木质素还具有抑制淀粉消化酶活性的能力，通过阻碍淀粉与酶的结合，减少淀粉水解为葡萄糖的量，在调节血糖和血脂方面^[33]发挥积极作用。

（2）可溶性膳食纤维

可溶性膳食纤维是一类可溶于水，在水中能形成凝胶状或溶胶状物质，并可被人体大肠内微生物发酵分解的膳食纤维。其化学结构丰富多样，主要包含果胶、植物胶、黏胶、菊粉、海藻多糖以及 β -葡聚糖等成分。这些成分赋予 SDF 独特的理化性质^[34]，使其区别于不溶性膳食纤维。

1.1.2.3 膳食纤维的制备方法

IDF 在总膳食纤维（Total dietary fiber, TDF）中的占比高达 90%以上，与 IDF 相比，SDF 因其良好的水溶性和丰富的功能活性而在食品工业生产中受到青睐，其表面形状、官能团和分子量是影响其物理、化学和功能性质的重要因素。因此，通过不同的方法使 IDF 转化为 SDF 成为了食品研究领域的热点。目前转化方法可概括为五种：化学法、酶解法、物理法、发酵法和联合法。

（1）化学法

化学提取法是通过酸、碱或溶剂处理样品，去除非纤维成分，碱性条件能破坏植物细胞壁中果胶与其他成分的连接键，酸可使细胞壁中多糖与蛋白质等其他

成分分离,从而提取可溶性膳食纤维,以改善其水溶性及生物活性等物质的方法。一些研究表明, Sun 等^[35]用 NaOH 处理肉苁蓉,通过对碱处理条件的优化, SDF 产率高达 19.66%,其中 SDF 的持水能力最强,对亚硝酸盐、胆固醇、胆酸钠和葡萄糖的吸附能力最强,而 IDF 具有较好的持油能力,这可能是由于 SDF 表面较松散,有利于更多水的渗透。此外, WHC 与暴露的亲水基团的数量有关——暴露的亲水基团越多,吸水率就越高。同时, IDF 的 OHC 高于 SDF。这是因为 DF 的 OHC 与木质素含量呈正相关,而木质素含量在 IDF 中较高。Punam 等^[36]研究了羧甲基化(CM)、羟丙基化(HP)和交联(CL)对燕麦膳食纤维(ODF)的物理化学、热学和微观结构特性的影响,从脱脂燕麦粉中提取的 ODF 总膳食纤维含量为 66.14%, SDF 水平升高归因于膳食纤维的羟基与羟丙基和羧甲基基的醚化。化学法转化虽然成本较低,但可能会降低 SDF 的生物活性^[37],同时化学处理可能会造成试剂残留污染,且发生的副反应所引入的基团会给食品带来安全隐患,容易造成严重污染,不符合高效便捷的生产要求。

(2) 物理法

物理法是利用蒸汽爆破法(Steam explosion method, SE),动态高压微流化、超细粉碎、高静水压力、蒸汽加工、挤出、超声波、微波和空化射流加工等作用产生的高压、高温、瞬时减压、爆炸、高速冲击和剪切等机械力促使 IDF 的糖苷键熔化或断裂,从而达到转化为 SDF 的目的^[38]。据报道,蒸汽爆炸处理是一种很有前途的快速提取纤维素纤维的替代工艺,纤维在高温下用高压蒸汽饱和一段时间,并立即释放压力。蒸汽爆炸法可以用作热机械化学过程,由三个综合效应组成:蒸汽产生的热量、水分膨胀产生的剪切力以及乙酸形成从纤维素纤维获得的半纤维素中乙酰基的水解^[39]。Li 等^[40]研究了 SE 处理对豆渣膳食纤维、蛋白质和理化性质的影响。结果表明,当 SE 强度为 1.5 MPa 持续 30 s 时, SDF 含量增加到 36.28%,比对照豆渣高 26 倍, SDF 含量增加的原因可能是 SE 处理可以松动纤维的紧密结构,从而使一些材料与纤维解聚结合。同时,高分子量多糖部分降解,导致可溶性膳食纤维增加。Xing 等^[41]研究了 SE 处理对茶渣提取膳食纤维(DF)理化和功能特性的影响。结果表明, SE 处理导致茶渣形成多孔且不致密的微观结构。与对照样品相比(12.41 g/100 g),由于 IDF 的降解, SE 显著提高了 SDF 的含量,达到最大值 23.03 g/100 g, SDF 产率升高的原因可能是 SE

处理后一些物质与纤维结合发生解聚，高分子量多糖部分降解。物理法转化的设备占地面积虽然较大且成本较高，但这是一种高效率、方便快捷、减少污染、在工厂化生产中容易实现的一种处理方法。

（3） 酶解法

单一酶解法：根据原料中可溶性膳食纤维的结构特点，针对性地选择合适的酶。例如，从植物胶中提取时，由于植物细胞壁中含有纤维素，阻碍植物胶的释放，此时可以使用纤维素酶来分解纤维素。Liu 等^[42]探究纤维素酶处理改性米糠膳食纤维的化学成分、结构、理化及功能特性。结果表明纤维素酶改性显著提高持水能力、持油能力、溶胀能力、胆固醇吸收能力和葡萄糖吸附能力，可能是因为纤维素酶破坏结晶区域，产生无定形结构，降低结晶度，使水更易渗透；增加纤维毛细管结构和孔隙率，提高表面张力与分子接触面积；增加羧基等极性基团数量，增强与水分子的相互作用。这种方法的优点是反应条件温和，对膳食纤维的结构破坏较小，能够较好地保留其生物活性。

复合酶解法：对于成分复杂的原料，单一酶往往无法高效提取目标可溶性膳食纤维，此时可采用多种酶协同作用的复合酶解法。多种酶联合使用能够更全面、高效地破坏原料结构，促使目标膳食纤维充分释放出来。如 Ma 等^[43]研究通过纤维素酶和木聚糖酶对马铃薯残渣膳食纤维进行改性，结果表明，纤维素酶/木聚糖酶处理显著提高了可溶性膳食纤维的含量，从 17.45% 提高到 26.82%。与未改性膳食纤维相比，酶改性膳食纤维表现出更高可溶性单糖含量、更强的热稳定性和更多的多孔结构。

（4） 发酵法

发酵法是利用微生物发酵过程产酸和产酶的特性对底物进行酸化或者酶解而使部分纤维素、不溶性半纤维素等水解，转变成 SDF。Sun 等^[44]以红曲为原料，采用液体发酵法制备豆渣红曲膳食纤维（OMDF），并对其膳食纤维结构和功能特性进行了研究，结果表明发酵后，OMDF 中可溶性 OMDF 含量为 7.7 g/100 g，是对照的 1.79 倍。此外，发酵后，虽然 IDF 含量降低，但 WHC 和 OH C 均有不同程度的改善，这是因为 OMDF 中的结构较松散，这增加了水的吸附性。*M. anka* 高度分枝的菌丝不易断裂，这可以降低发酵液的粘度，这对氧气转移和细胞生长有益，改变了其结构并进一步影响其性能。复合菌株发酵：用两种

及以上菌株进行发酵可以利用其不同的发酵特点对底物进行降解, 大幅提高 ID F 的转化率, 促进 SDF 的产生。Si 等^[45]研究的目的是筛选和分离高效的纤维素降解菌株并构建复合微生物系统并进一步评价发酵处理对膳食纤维结构特性和吸附性能的影响。与单菌株发酵相比, 混合发酵法 (MF-SDF) 从茶渣中得到的可溶性膳食纤维产量显著提高。发酵法转化的时间周期相对较长, 容易受到其他微生物的污染, 生产工艺难控制, 但这是一种相对无害、高效、甚至环保的转化方法, 且产物的纯度较高。

(5) 联合法

联合法制备膳食纤维, 是融合化学法、物理法、酶法、发酵法等多种手段的工艺。它优势显著, 能显著提高膳食纤维得率, 比如先用化学法初步处理, 再借酶法降解杂质, 可让产出量大幅提升。该方法还能改善膳食纤维品质, 像物理法的超细粉碎增大比表面积后, 经发酵法进一步优化, 能显著增强其持水性等特性。同时, 联合法能减少单一方法的局限, 规避化学法结构破坏、酶法成本高、物理法效果不足等问题, 更高效地去除蛋白质、脂肪、淀粉等杂质, 提纯膳食纤维。此外, 它能依据不同原料特性灵活搭配方法, 拓宽了膳食纤维的原料来源。如 Z hou 等^[46]通过酶 (E-DF) 和超声辅助共熔溶剂 (US-DES-DF) 从脐橙皮残留物中提取膳食纤维 (DF), 并对其理化和益生元特性进行表征, 超声辅助 DES 提取通过显著提高可溶性膳食纤维和总膳食纤维含量 (分别为 $3.29 \pm 1.33\%$ 和 $10.13 \pm 0.78\%$) 改善了脐橙 DFs 的性能, 并显著提高了持水力、持油力和水溶胀力, 可能是因为超声空化破坏植物细胞壁结构来提高天然产物提取的可持续性, 利用 DES 处理橙渣, 去除木质素, 并与其他处理程序相结合, 促进纤维素转化为可溶性膳食纤维, 可以增强橙子膳食纤维的生理功能。Wang 等^[47]研究了桔皮与蒸汽爆破 (SE) 和硫酸浸泡 (SAS) 的耦合预处理, 以提高 SDF 的产量并改善其功能。结果表明, SDF 含量比对照提高到 33.74%, 产率提高的原因可能是酸浸样品具有疏松且多孔的结构并且松散和多孔的结构可能导致高压蒸汽渗透到桔皮细胞组织中的增加, 从而形成更强大的爆炸减压, 将这些聚合物转化为可溶性糖。

1.1.2.4 可溶性膳食纤维的功能性质

(1) 调节肠道菌群: 可作为益生元, 被肠道有益菌如双歧杆菌、乳酸杆菌等利用, 促进其生长繁殖, 抑制有害菌的生长, 从而维持肠道微生态平衡, 改善肠

道健康。促进肠道蠕动，增加粪便体积，使粪便柔软湿润，易于排出，可预防和缓解便秘，降低肠道疾病的发生风险^[48-50]。

(2) 延缓碳水化合物吸收：在肠道内形成一种黏性环境，减缓碳水化合物的消化和吸收速度，有助于稳定餐后血糖水平，对预防和控制糖尿病具有一定作用^[51]。在过去的几十年，II 型糖尿病的发病率最高，占有所有疾病的 90%，其增长速率非常迅速，预计到 2030 年，全球糖尿病患病率将达到 66.2%^[52]。Cheng^[53] 等指出 SDF 具有疏松多孔的网络结构，可以形成一道天然的物理屏障，使葡萄糖的迁移受到限制，同时由于表面极性或非极性基团更多的暴露，使二者之间的相互作用增强。

(3) 降低血脂：SDF 通过调节食物摄入、消化吸收和代谢来阻止脂肪吸收，减少能量的摄入^[54]，SDF 具有半乳糖醛酸结构，可以形成高粘度的水凝胶，使营养物质的迁移受到限制。吸水性强，在胃中可吸收大量水分而膨胀，使人产生饱腹感，减少食物的摄入量，有利于控制体重和减肥。减少食物摄入量能结合胆汁酸、胆固醇等物质，减少它们在肠道内的吸收，促进其排出体外，进而降低血液中胆固醇和甘油三酯的水平，有助于预防心血管疾病^[55]。

1.1.2.5 可溶性膳食纤维应用领域

(1) 食品领域

在食品行业，SDF 是至关重要的添加剂，发挥着多种关键作用。在酸奶制品中，它能与乳蛋白、脂肪等相互作用，形成复杂网络结构，提升黏稠度，防止乳清蛋白析出和分层，优化产品感官品质。凭借卓越的吸水膨胀特性，它在减肥与健康食品领域应用广泛。制作低卡面包时，添加 SDF 可使其在面团醒发和烘焙时吸水膨胀，增大面包体积，改善口感，减少消费者对高热量食物的摄取^[56]。在代餐产品方面，以谷物、豆类为原料的代餐粉加入它后，能让人产生长时间的饱腹感，满足人体对膳食纤维的需求，为忙碌的现代人提供了便捷又健康的饮食选择。

(2) 医药领域

从医药视角看，SDF 对人体健康意义重大。在肠道微生态调节方面，它作为益生元为双歧杆菌、乳酸菌等有益菌提供养分，助力其大量繁殖。有益菌在生长代谢时产生短链脂肪酸，降低肠道 pH 值，抑制大肠杆菌、沙门氏菌等有害菌生

长^[57]，维持肠道微生态平衡，对预防和缓解便秘、腹泻等肠道疾病至关重要。在降血脂、血糖产品研发与应用中，SDF 也发挥关键作用。它在肠道内形成黏性环境，像屏障一样阻碍消化酶与碳水化合物充分接触，延缓碳水化合物消化吸收。糖尿病患者摄入含该膳食纤维的食物或补充剂后，餐后血糖上升趋势变缓，利于血糖控制。同时，它还能降低血液中胆固醇和血脂水平，减少动脉粥样硬化等心血管疾病发生风险^[58]，对心血管疾病的辅助治疗和预防有积极意义。

（3）材料领域

在材料学范畴，SDF 用途独特且实用，其成膜性使其在食品包装领域前景广阔。将它与多糖、蛋白质等可食用成膜材料混合，经特定工艺制成的可食用包装膜，具备一定机械和阻隔性能^[59]。这种包装膜环保可降解，使用后能被微生物分解，避免了传统塑料包装造成的长期环境污染问题。同时，它还能延长食品保鲜期，一方面作为物理屏障，阻挡氧气、水分和微生物与食品接触，抑制食品氧化和微生物污染；另一方面，部分可溶性膳食纤维具有抗氧化、抗菌等生物活性，可进一步延缓食品变质，减少食品防腐剂的使用，为消费者提供更安全、健康的食品包装选择。

在组织工程领域，SDF 作为生物支架材料优势独特。组织工程旨在构建能修复或再生受损组织器官的生物活性替代物，而可溶性膳食纤维可通过物理或化学方法制成特定三维结构支架^[60]。它富含亲水性基团，能与细胞表面受体相互作用促进细胞黏附，还能调节细胞微环境信号分子浓度，影响细胞行为，助力组织修复再生。如在皮肤组织工程中，其能促进表皮和真皮细胞生长分化，加速伤口愈合，减少疤痕形成。

SDF 可用于制备水凝胶材料，在药物缓释和伤口敷料方面意义重大^[61]。在药物缓释领域，药物被包裹在其制成的水凝胶微球中，利用水凝胶溶胀特性和吸附作用，实现药物缓慢释放，延长作用时间、提高疗效并减少给药频率与毒副作用。在伤口敷料方面，含 SDF 的水凝胶敷料能吸收渗出液、保持伤口湿润，其生物活性还可抑制感染，为伤口愈合营造良好微环境。

1.2 立题依据

BSS 含有 22.96%纤维素、17.73%半纤维素和 10.55%木质素，纤维素含量高于其他有机物，木质素含量低。竹子生长迅速，仍表现出一系列的木质化阶段。

竹笋壳由内而外，木质化程度不同。木质化含量低有利于纤维素的提取分离。竹笋壳中的 DF 含量丰富，并且与 IDF 相比，SDF 具有更好的生理功能，包括其可以发挥益生元作用，改善血糖指数和降低血脂，抗肥胖和抗癌。因此，通过联合法含量极高的 BSS 转化为 SDF 并探索多种方法联合制备 SDF 的机制，同时将转化形成的 SDF 应用于新型食品包装膜中对食品领域的发展及人体健康至关重要。

本研究以 BSS 为原料，采用蒸汽爆破法-碱法-微生物发酵联合对 BSS 进行转化处理，通常的方法制备 SDF 后会有大量 IDF 残留，因此为了提高 IDF 的利用率，以 IDF 为发酵底物进行微生物发酵，采用两步法最大极限的利用 BSS 转化成 SDF，提高 SDF 的产率。微生物发酵主要采用乳酸菌，因为乳酸菌在发酵过程中会产生多种胞外酶，如纤维素酶、半纤维素酶或者产生乳酸、乙酸等^[57]有机酸以及一些风味物质，这些能够破坏细胞壁的结构并且抑制有害微生物的生长。

通过相关性分析，比较不同方法制备的 SDF 的产率、结构、性能等方面的影响。这探索了提高 BSS-SDF 产量的机制，以联合使用多种方法。希望这一发现将有助于开发 SDF 生产方法及其功能调控。

1.3 主要研究内容

(1) 竹笋壳 SDF 提取工艺探索及其性质研究

以毛竹笋壳为原料，采用纳豆菌和乳酸菌混合物为发酵菌种以及多种材料、试剂和仪器，配置了种子培养基和 MRS 培养基。实验涵盖竹笋壳粉制备、菌种活化，以及不同化学-微生物联合处理、蒸汽爆破法、碱萃取、一步法和两步法等条件对 SDF 提取率的优化实验，还包括 SDF 产率及 WHC、OHC、溶解度等性能测定实验，探索制备 SDF 的最优工艺。

(2) 蒸汽爆破-碱法-微生物法提取竹笋壳 SDF 及性能改良方面的耦合作用研究

对 BSS 预处理后，分别采用水萃取(Water extraction, WE)、碱性萃取(Alkaline extraction, AE)、蒸汽爆破与碱性萃取法联合(SE-AE)、蒸汽爆破/碱溶/微生物发酵联合(SAM)的方法制备 SDF，测定 SDF 产量。同时，对发酵过程中的 pH、蛋白质含量、蛋白酶活性、纤维素酶活性进行监测，并对 SDF 进行溶解度、流变、扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射(XRD)、

热重分析(TGA)等表征,以及测定 SDF 的 WHC、OHC、葡萄糖吸附性能(GAC)、抗氧化能力、总酚含量、总黄酮含量等性能。揭示了三种方法的协同机制,为其他物质 SDF 生产提供参考,且 SDF 在调节和合成智能食品包装聚合物方面具有潜在重要性。

第2章 竹笋壳 SDF 提取工艺探索及其性质研究

2.1 前言

竹笋壳是竹笋加工过程中产生的主要副产品，占竹笋总重量的 20%-30%。传统上，竹笋壳多被废弃或焚烧，不仅造成资源浪费，还可能对环境产生负面影响^[54]。然而，近年来随着对可持续资源和功能性食品成分的关注，竹笋壳因其丰富的生物活性成分和独特的理化性质，逐渐成为食品化学领域的研究热点。竹笋壳富含纤维素、半纤维素、木质素、多酚类、黄酮类及多糖等多种功能性成分，具有抗氧化、抗菌、抗炎等多种生物活性^[62]。同时竹笋壳经加工得到的膳食纤维被定义为第七种营养物质，具有改善肠道菌群，减少肥胖和心血管疾病等作用。膳食纤维的提取方法^[63]主要包括化学法、微生物法和物理法。化学法通过酸解、碱解、氧化或溶剂处理，能够高效去除原料中的非纤维成分，但可能破坏膳食纤维的结构并产生环境污染。微生物法则利用酶制剂（纤维素酶、木聚糖酶、木质素氧化酶等）或微生物发酵（纳豆菌、乳酸菌和马克斯克鲁维酵母等）降解非纤维成分，具有反应条件温和、环保性好的优势，但成本较高且工艺复杂。物理法作为一种绿色、环保的提取手段，通过机械或物理作用分离原料中的纤维成分，具有操作简单、对纤维结构破坏小、无化学残留等优点。常见的物理提取方法包括机械粉碎法、超声波辅助提取法、高压均质法、微波辅助提取法、超临界流体萃取法、冷冻研磨法和气流分级法等。这些方法在提取效率、设备成本和适用场景上各有优劣此外，结合多种方法的复合提取技术也逐渐成为研究热点，旨在提高膳食纤维的得率、纯度和功能性。并且其膳食纤维还表现出优异的益生元作用、血糖调节功能及环保特性。这些特性使得竹笋壳及其膳食纤维在功能性食品、药品和环保材料领域展现出广阔的应用前景。

近年来，联合法在膳食纤维提取中的应用受到了广泛的关注。如水结合湿法球磨提取及木瓜膳食纤维功能评价的影响，和水提法和碱提法相比，水法和湿法球磨联合法提取的 DF 的 WHC 提高了 4.1 倍，OHC 提高了 1.7 倍并且还提高了胆固醇吸附能力（Cholesterol adsorption capacity, CAC）、GAC 等；性能提高主

要是因为球磨通常使用湿介质或干球磨技术进行,在湿球磨工艺中,多糖和水分子之间的相互作用,以及与球和容器壁的碰撞,会产生摩擦热。这种热量有助于改变多糖的性质,水萃取与湿球研磨萃取相结合可能会产生协同效应,最大限度地发挥两种技术的优势并提高整体萃取效率。这些技术的结合可以增强对更广泛高官能度 DF 的提取,从而提供具有吸引人的功能特性的代表性提取物^[64]。蒸汽爆炸与酶解联合处理诱导高可溶性膳食纤维豆渣蛋腐的凝胶化机理,结果表明,改性后豆渣中 SDF 的含量从 2.14%增加到 32.13%,在 SE 处理过程中,类酸水解、热降解、机械断裂和氢键破坏等作用可以降解和破坏包括纤维素、半纤维素和木质素在内的高分子量化合物降解成小分子 SDF,因此,联合改性处理是增加豆渣 SDF 含量的有效方法^[65]。本文探究蒸汽爆破法、水法、酸法、碱法和微生物发酵法优化对提取竹笋壳 SDF 的影响及其探物理-化学-微生物联合法的最优工艺,有利于提高 SDF 的产量,有利于开发高品质的 DF,广泛应用于功能性食品行业。

2.2 材料与仪器设备

2.2.1 材料

竹笋壳(BSS)来源于毛竹笋属于莎草目禾本科植物,购自于云南西双版纳勐海叶茶店,乳酸菌(*Lactic acid bacteria*, LAB)混合物包括保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)和嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*),购自北京川秀科技有限公司;纳豆芽孢杆菌(*Bacillus subtilis natto*, *B. natto*)实验室保存菌株。

2.2.2 主要试剂

表 2-1 主要试剂

Table 2-1 Main reagents

药品名称	药品类型	药品来源
氯化钠	分析纯	国药集团试剂有限公司
牛肉浸膏	分析纯	国药集团试剂有限公司
葡萄糖	分析纯	国药集团试剂有限公司

蛋白胨	分析纯	国药集团试剂有限公司
MRS 培养基	分析纯	国药集团试剂有限公司
氢氧化钠	分析纯	国药集团试剂有限公司
盐酸	分析纯	国药集团试剂有限公司
胰蛋白胨	分析纯	国药集团试剂有限公司

2.2.3 主要仪器

表 2-2 主要仪器

Table 2-2 Main instruments

仪器名称	型号	产地
电子天平	KFS-C	中国凯丰集团有限公司
超净工作台	SW-CJ-1F	苏州安泰空气技术有限公司
电热恒温干燥箱	202	北京科伟永兴仪器有限公司
振荡培养箱	BS-1E	常州国图电器有限公司
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	邦西仪器科技（上海）有限公司
高压灭菌锅	SYQ-DSX-280B	上海申安医疗器械厂
超纯水机	LD-DI-15V	上海硕鼎水处理设备公司
Thermo酶标仪	Multiskan	北京海天友诚科技有限公司
移液枪 8000-14000	20P、200P、1000P	法国 GILSO 公司
离心机	TG16-W 台式	湖南湘仪实验室仪器开发有限公司
真空冷冻干燥机	FD-1A-50+	博医康仪器有限公司
电热恒温水浴锅	HWS-24 型	山东千司科学仪器有限公司
精密试纸	pH5.5-9.0	上海三爱思 PH 试纸
pH 仪	YW-18W-A	上海亿世电器有限公司
汽爆工艺试验台	QBS-80	清正生态科技（苏州）有限公司

2.2.4 培养基

种子培养基：胰蛋白胨 10 g/L，葡萄糖 20 g/L，牛肉浸膏 5 g/L，pH 调至 7.0。

MRS 培养基：酪蛋白酶消化物 10 g，牛肉膏粉 10 g，酵母膏粉 4 g，柠檬酸三铵 2 g，乙酸钠 5 g，硫酸镁 0.2 g，硫酸锰 0.05 g，磷酸氢二钾 2 g，葡萄糖 20 g，吐温-80 1.08 g，pH 调至 5.7。

2.3 实验方法

2.3.1 竹笋壳粉的制备

(1) 蒸汽爆破处理 BBS 粉末：将 BSS 用 50℃的温水清洗去除表面杂质及绒毛，烘干后将 BSS 切成小块，放入蒸汽爆破机中，0.8 MPa 下处理 3 min，收集样品放入 70℃烘箱中烘干，碾碎，过 40 目筛，将其置于密封袋中备用。

(2) BSS 粉末的制备：将烘干的 BSS 块状碎片放入粉碎机中，碾碎，过 40 目筛，将其置于密封袋中备用。

2.3.2 *B.natto* 的斜面培养及活化

将菌株从保存的甘油管吸取适量至 LB 固体培养基平板划线，37℃培养 14 h，挑取单菌落至 LB 液体培养菌中，37℃，200 rpm 振荡培养 14 h，随后吸取 1 mL 菌体至种子培养基中，37℃，200 rpm 振荡培养 14 h，OD₆₀₀ 在 0.7-0.8 之间待用。

2.3.3 LAB 培养及活化

MRS 培养基：准确称取 2.7 g MRS 肉汤培养基粉加入 50 mL 蒸馏水，90℃水浴溶解后，调节 pH 至 6.5，于 121℃高温蒸汽灭菌 15 min，待用。准确称取 LAB 粉 0.5 g，于超净工作台接入 50 mL MAS 培养基中，37℃恒温无氧静置培养 12 h。

2.3.4 不同化学-微生物联合处理条件对 SDF 提取率的优化

- (1) 不同化学提取方法优化：用水处理，酸处理和碱处理竹笋壳；
- (2) 不同微生物单独发酵及其联合顺序发酵优化：LAB，BN 单独发酵；联合发酵先 LAB 后 BN，先 BN 后 LAB；
- (3) 一步法和两步法提取 SDF 优化。

2.3.4.1 化学法制备 SDF

(1) 水提法制备 SDF：称取竹笋壳粉 5 g 于 250 mL 锥形瓶中，按照 1:20 料液比加入蒸馏水，温水浴锅中搅拌 1 h，水提结束后，4000 r/min 离心 10 min，收

集上清液，离心的沉淀物，放置到烧杯中时用 100 mL 的蒸馏水冲洗三次至中性，收集得到的沉淀物冷冻干燥后得到不可溶性膳食纤维（IDF），将所得上清液在 90℃水浴锅中加热浓缩至 1/3 体积，冷却，称量，加入相应 4 倍体积 95%乙醇沉降一夜，4000 r/min 离心 10 min，收集沉淀，冷冻干燥后得 SDF,命名为 Wa-SDF。

（2）酸提法制备 SDF：称取竹笋壳粉 5 g 于 250 mL 锥形瓶中，按照 1:20 料液比加入 1% HCl，50℃浴锅中搅拌 1 h，酸提结束后，用合适浓度的 NaOH 溶液调 pH 至中性后，步骤同（1），冷冻干燥后得 SDF,命名为 Ac-SDF。

（3）碱提法制备 SDF：称取竹笋壳粉 5 g 于 250 mL 锥形瓶中，按照 1:20 料液比加入 0.5 M NaOH，50℃浴锅中搅拌 1 h，碱提结束后，用合适浓度的 HCl 溶液调 pH 至中性后，步骤同（1），冷冻干燥后得 SDF,命名为 Al-SDF。

2.3.4.2 化学法-微生物制备 SDF

（1）水提法联合微生物制备 SDF（一步法）：称取竹笋壳粉 5 g 于 250 mL 锥形瓶中，按照 1:20 料液比加入蒸馏水，温水浴锅中搅拌 1 h，水提结束后，调节适当的 pH 环境，在 121℃灭菌 15 min，取出后冷却至室温，制备四种不同的发酵培养基分别接入纯纳豆芽孢杆菌，乳酸菌、先乳酸菌后纳豆芽孢杆菌和先纳豆芽孢杆菌后乳酸菌，总的接菌量均为 4 mL，发酵温度为 37℃,发酵时间为 48 h。发酵结束后，步骤同 2.3.4.1（1），冷冻干燥后得 SDF,命名为 W-MF-SDF。

（2）水提法制备 SDF:(两步法)：称取竹笋壳粉 5 g 于 250 mL 锥形瓶中，按照 1:20 料液比加入蒸馏水，温水浴锅中搅拌 1 h，水提结束后，调 pH 至中性，步骤同 2.3.4.1（1），冷冻干燥后得 IDF 和 SDF；

准确称取水提法制备的 IDF 5 g，按照 1:20 料液比加入蒸馏水，置于 50℃恒温水浴锅中搅拌 1 h，调节适当的 pH 环境，在 121℃灭菌 15 min，取出后冷却至室温，制备四种不同的发酵培养基分别接入纯纳豆芽孢杆菌，乳酸菌、先乳酸菌后纳豆芽孢杆菌和先纳豆芽孢杆菌后乳酸菌，总的接菌量均为 4mL，发酵温度为 37℃,发酵时间为 48 h。发酵结束后，4000 r/min 离心 10 min，离心的沉淀物，放置到烧杯中时用 100 mL 的蒸馏水冲洗三次，收集得到的沉淀物冷冻干燥后得到 IDF，将所得上清液在 90℃水浴锅中加热浓缩至 1/3 体积，冷却，称量，加入相应 4 倍体积 95%乙醇沉降一夜，4000 r/min 离心 10 min，收集沉淀，冷冻干燥后得 SDF，命名为 WI-MF-SDF。

酸提/碱提-微生物制备 SDF 方法同上。酸法提取的 SDF:一步法命名为 Ac-MF-SDF, 两步法命名为: AcI-MF-SDF; 碱法提取的 SDF:一步法命名为 Al-MF-SDF, 两步法命名为: AlI-MF-SDF。

2.3.5 蒸汽爆破法(Steam explosion ,SE)优化

(1) 蒸汽爆破法压力优化: 将合适的块状竹笋壳放入蒸汽喷射器中, 处理压力分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 MPa, 保持时间为 3 min, 研究了处理压力对 SDF 提取率的影响。

(2) 蒸汽爆破法时间优化: 将合适的块状竹笋壳放入蒸汽喷射器中, 分别保持时间为 1、3 和 5 min, 处理压力为 0.8 MPa, 研究保持时间对 SDF 提取率的影响。

注: 优化后蒸汽爆破法-碱法制备的 SDF 命名为: SA-SDF。

2.3.6 碱萃取(Alkaline extraction ,AE)参数的优化

(1) 碱提浓度优化: 称取 5 等份竹笋壳粉 (5.0 g), 按 1:20 的比例加入 (0、0.25、0.5、0.75、1 mol/L) NaOH 溶液, 在 50°C 碱解 90 min, 调节 pH 值至中性, 研究碱水解浓度对 SDF 提取率的影响。

(2) 碱性提取时间优化: 称取 5 份竹笋壳粉 (5.0 g), 按 1:20 的比例加入 1 mol/L NaOH 溶液, 分别在 50°C 下碱解 30、60、90、120、150 和 300 min, 并将 pH 值调节至中性, 探讨碱解时间对 SDF 提取率的影响。

注: 碱提优化后制备的 SDF 命名为: A-SDF。

2.3.7 两步法-微生物发酵优化

(1) 最佳微生物选择: 基于上述方法优化结果, 称取蒸汽爆破-碱法制备的 IDF 适量, 按 1:20 与液体的比例加入 1 mol/L NaOH 溶液, 在 50°C 恒温水浴中搅拌 1.5 h, 调节适宜的 pH 环境, 在 121°C 灭菌 15 min, 取出并冷却至室温。添加 4 mL BN、LAB、LAB-BN 和 BN-LAB 种子溶液, 以研究微生物对 SDF 提取率的影响。

(2) 发酵培养基优化: 1) 氮源优化: 以蒸汽爆炸法中的 IDF 发酵培养基为基础培养基, 氮源浓度变量按质量体积设置为 1%、2%、4%、6% 和 10% 胰蛋白酶溶液。用量固定为 4 mL, 接种 4 mL 种子培养基, 37°C 温育 48 h, 研究氮源浓度对 SDF 提取率的影响。2) 碳源优化: 以蒸汽爆炸法中的 IDF 发酵培养

基为基础培养基，在确定氮源浓度的基础上，加入一个碳源。碳源浓度变量按质量体积比设置为 0.5%、1%、2%、4% 和 6% 葡萄糖溶液。用量固定为 4 mL，接种 4 mL 种子培养基，37℃温育 48 h，研究氮源浓度对 SDF 提取率的影响。

注：优化后制备的 SDF 命名为：SAM-SDF

2.3.8 SDF 产率

SDF 产量根据报告的方法^[66]从 BSS 到 SDF 的转换百分比，按如下公式计算（2-1）

$$\text{SDF 得率 (\%)} = \frac{m}{M} * 100\% \quad (2-1)$$

其中，M 和 m 分别是所用 BBS 粉末的干重和相应的 SDF。

2.4 性能测定

2.4.1 持水能力（WHC）

根据已有的文献略微修改^[67]，将 0.5 g SDF 样品与 10 mL 蒸馏水在 37℃ 下充分混合 1 h，并将沉淀物以 4000 rpm 离心 15 min。除去上清液，称取湿沉淀物，称量为 W_w 。SDF 的 WHC 由公式（2-2）计算。

$$\text{WHC (g/g)} = \frac{W_w - 0.5}{0.5} \quad (2-2)$$

2.4.2 持油能力（OHC）

根据已有的文献略微修改^[68]，将 0.5 g SDF 样品与 10 mL 葵花籽油在室温下混合 2 h，并将沉淀物以 4000 rpm 离心 30 min。除去上清液，称取湿沉淀物，按 W_o 。SDF 的 OHC 由公式（2-3）计算。

$$\text{OHC (g/g)} = \frac{W_o - 0.5}{0.5} \quad (2-3)$$

2.4.3 溶解度（Solubility）

根据已有方法测定 SDF 的溶解度^[66]。将 BSS-SDF（0.1 g）与 10 mL 蒸馏水混合，并在室温下放置 1 h。将混合物以 4000 rpm 离心 10 min，收集沉淀，冷冻干燥，称重。SDF 的溶解度（Solubility）由公式（2-4）计算。

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_2} * 100\% \quad (2-4)$$

其中， w_1 （g）和 w_2 （g）分别表示未溶解的 SDF 和总 SDF 的权重。

2.5 结果与讨论

2.5.1 不同方法对 SDF 提取的影响

如图 2-1 (A) 所示, 与水提和酸提法相比, 碱法提取 SDF 的产率最高为 9%, 是水提法的 2.8 倍, 酸提法的 1.8 倍。由此可知碱提取法产率最高是因为竹笋壳主要由纤维素、半纤维素和木质素组成, 通过复杂的化学键如酯键、醚键等交联, 形成致密结构, 碱液能破坏细胞壁中的酯键和醚键, 使纤维素和半纤维素从木质素中分离出来^[69]; 此外, 碱液能够溶解部分半纤维素和木质素, 还会进一步水解半纤维素中的糖苷键。这一过程会让细胞壁结构变得疏松, 促使其降解为低分子量多糖, 进而释放出更多的 SDF^[70]。纤维素是竹笋壳中主要的膳食纤维成分, 但其结晶度较高, 这使得水提法和酸提法难以有效地将其溶解。在提取 SDF 时, 水提法和酸提法的效率相对较低, 这可能是由于半纤维素在酸性条件下容易形成不溶性复合物。与碱提法相比, 水提法和酸提法对细胞壁的破坏能力较弱, 不仅难以充分打破细胞壁结构释放 SDF, 还容易促使部分成分形成不溶性复合物, 进一步阻碍了 SDF 的提取, 所以整体提取效率较低。

如图 2-1 (A) 和 (B) 所示, 化学法和微生物法结合制备 SDF, 一步法相较于碱法制备 SDF 的产率相差不大可能是因为碱液预处理的过程中产生的 SDF 为微生物发酵提供更易处理的底物, 所以微生物相较于竹笋壳更喜欢以 SDF 为发酵底物, 图 2-1 (A) 可知 Al-SDF 的产率为 9%, 图 2-1 (B) 中 Al-LAB-BN-SDF 的产率为 8.34%。无论是碱法还是化学法与微生物发酵法结合, 都能充分降解原料中的纤维素和半纤维素, 释放 SDF, 碱法直接通过化学作用, 而化学法与微生物发酵法结合通过化学预处理和生物酶解间接实现类似效果, 最终产率相近。

如图 2-1 (B) 和 (C) 所示两步法制备 SDF 的产率相较于一步法, 产率明显提高可达 15%, 产率提高可归因于发酵前期, 将碱预处理制备的 SDF 剔除, 使得微生物只能以 IDF 为主要底物进行发酵, 而碱液预处理在其中发挥了重要作用, 它能够初步降解原料中的木质素和半纤维素等物质, 为微生物发酵提供了更易于利用的底物。在发酵过程中, 微生物能够分泌多种酶, 例如纤维素酶、半纤维素酶以及果胶酶等, 这些酶能够高效地降解原料中的复杂多糖, 将其转化为低分子量的 SDF。这不仅提升了 SDF 的溶解性, 使其在后续应用中更易被利用, 还增强了 SDF 的生物利用度, 从而促使整体产率明显提高。所以两步法可以显

著提升 SDF 的产率。联合法能够利用农业废弃物作为原料，降低生产成本，实现资源的高效利用，是一种高效、绿色的制备方法。

注：Wa-MF、Ac-MF 和 Al-MF 表示水提法、酸法和碱法与微生物法一步法联合制备 SDF；Wa+WaI-MF、Ac+AcI-MF 和 Al+AlI-MF 表示两步法制备 SDF 的总和。

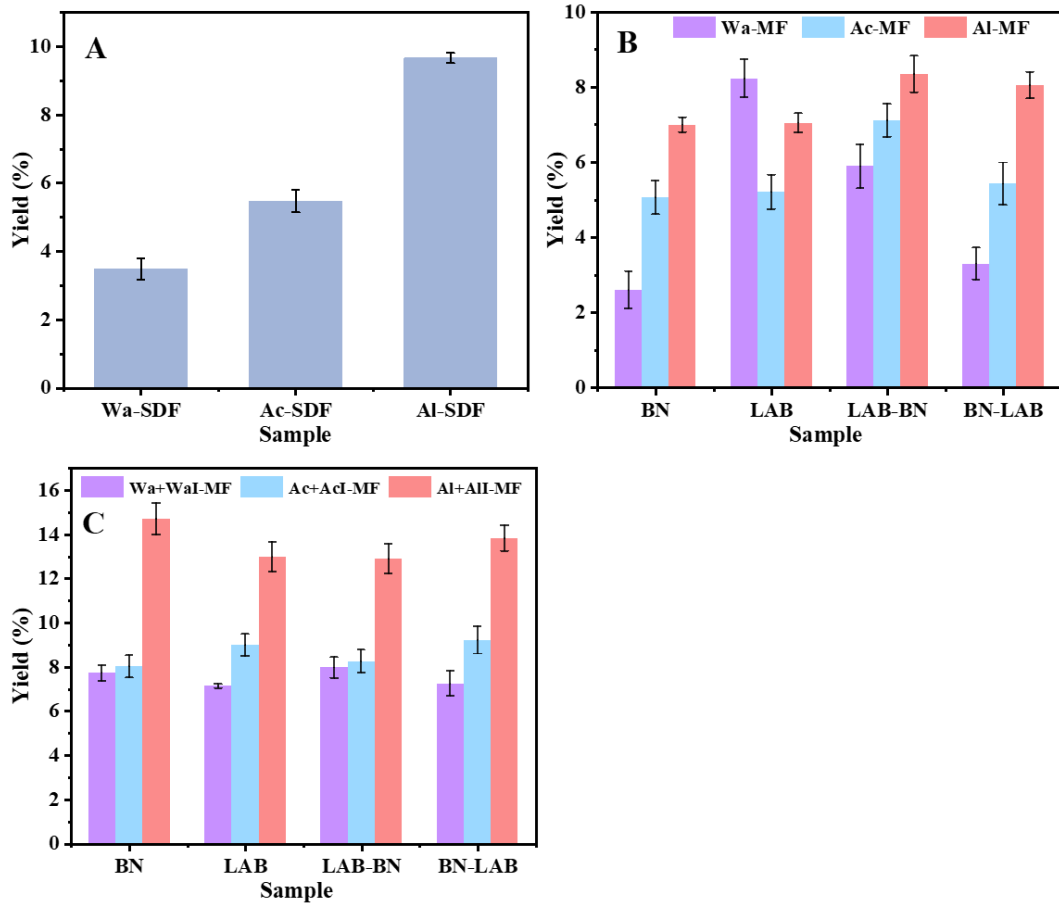


图 2-1 不同化学方法 (A)、化学-微生物提取一步法 (B) 和两步法 (C) SDF 的产量的影响

Fig. 2-1 Yields of SDFs by different chemical methods (A), one-step chemical-microbial extraction method (B), and two-step method (C)

2.5.2 气爆法优化

如图 2-2 (A) 和 (B) 所示，SDF 产量随着处理压力和处理时间的变化呈现先增加后降低的趋势，SDF 产量增加的原因可能是在 SE 预处理过程中，压力的瞬时释放使细胞壁结构破裂，并破坏纤维与其他物质之间的连接，这种结构变化有利于 SDF 的提取，使 SDF 的产量进一步增加，同时 IDF 含量降低^[71]。结果表明，SE 处理进一步促进了 DF 的溶解并将 IDF 转化为 SDF。在不同处理压力和

时间的条件下 SDF 的产量最高达到 15%左右, 是 Wa-SDF 的 6 倍多, 这也可能是因为蒸汽爆破预处理使植物细胞壁破裂^[72], 让碱液能够更充分地接触到内部的膳食纤维, 大大提高了碱液与膳食纤维的反应效率。同时, 蒸汽爆破造成的纤维结构变化和杂质降解, 也使得碱液的作用更加有效, 二者相互配合, 产生了比单独使用蒸汽爆破或碱液提取更好的效果。在蒸汽爆破时, 过高压力与过长时间会引发一系列不利变化, 如膳食纤维分子链过度断裂, 生成分子量过小、失去膳食纤维特性的片段^[73], 羟基、羧基等关键官能团遭破坏。也有可能使植物细胞壁等结构因过度压缩重排, 致使膳食纤维被紧密包裹, 形成的致密结构阻碍提取剂接触, 使其难以溶出, 降低可溶性膳食纤维提取产率, 如图可知, 处理时间 3 min 的前提下, 压力为 1.0 MPa 时产率最低为 7.64%, 在压力为 0.8 MPa 的前提下, 处理时间 5 min 产率最低为 8.55%。因此, 选择 SE 处理压力为 0.8 MPa, 时间 3 min 时 SDF 的产率最高, 并进一步研究碱处理条件对 SDF 产率的影响。

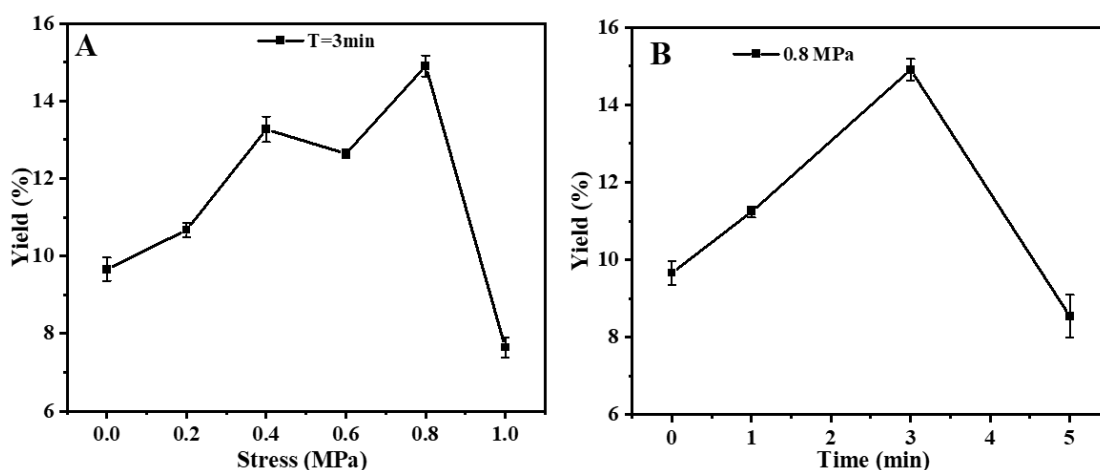


图 2-2 蒸汽爆破法处理压力 (A) 和处理时间 (B) 对 SDF 产量的影响。用 0.5 M NaOH 溶液处理 1h 作为对照

Fig. 2-2 Effect of steam blasting treatment pressure (A) and processing time (B) on SDF production. Treat with 0.5 M NaOH solution for 1 h as a control.

2.5.3 碱提法优化

如图 2-3 (A) 和 (B) 所示, SDF 的产率随着碱处理的浓度和时间的增大而逐渐升高, 主要是因为较高浓度的碱液能增强对膳食纤维分子中糖苷键等化学键的水解作用, 更有效地使多糖链断裂形成更多小分子可溶性片段; 同时可以更

充分地溶解果胶等膳食纤维成分^[74], 还能加大对蛋白质、脂肪等杂质的去除力度, 减少杂质对膳食纤维的包裹和干扰, 如图 2-3 (A) 可知, 在时间为 1 h 的前提下, 碱浓度为 1 mol/L 时, SDF 的产率最高为 14%, 进一步延长碱处理时间则能使这些反应更充分地进行, 让膳食纤维与碱液有更多时间接触和反应, 可以断裂分子链、溶解更多膳食纤维并去除杂质, 从而提高 SDF 的产率, 碱浓度为 1 mol/L 的前提下, 处理时间 1.5 h 时 SDF 的产率到达 17.47%。随着碱处理时间增长, SDF 产率渐趋平稳, 原因可能是碱处理提取 SDF 是化学反应, 随时间推进反应达平衡, 反应物与生成物浓度稳定, SDF 生成量随之固定, 产率平稳; 也有可能是原料中可转化为 SDF 的成分有限, 随时间延长, 可提取部分逐渐被提尽, 接近完全提取时, 即便延长时间, SDF 产量也难提升; 并且膳食纤维结构有稳定性, 碱液能破坏结构促转化, 但剩余膳食纤维结构稳定后, 碱液作用受限, 长时间碱处理引发副反应, 如部分 SDF 降解或发生其他反应, 抵消提取反应对 SDF 产量的提升; 反应后期传质受限, 阻碍碱液与膳食纤维接触, 导致产率不再提高。综上所述碱处理提取的最优条件是碱浓度为 1 mol/L, 时间为 1.5 h 时 SDF 的产率最高, 进一步研究微生物对 SDF 产率变化的影响。

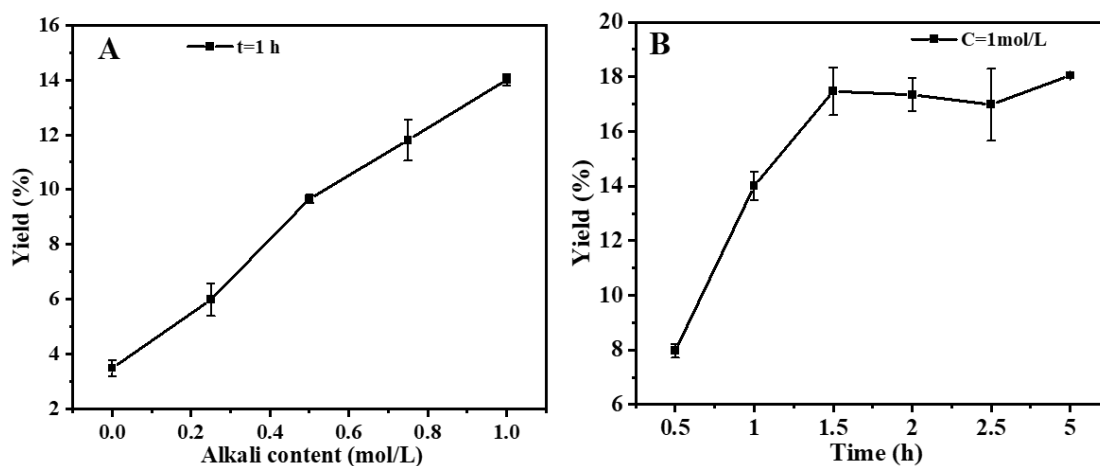


图 2-3 碱处理的碱含量 (A) 和处理时间 (B) 对 SDF 产率的影响

Fig. 2-3 Effect of alkali content (A) and treatment time (B) of AE on SDF yield

2.5.4 微生物发酵提取方法研究

如图 2-4 (A) 所示, SE 和 AE 处理后制备的 IDF 作为发酵培养基时, LAB 发酵 SDF 的产率最高为 27.5%, 原因可能是乳酸菌在发酵时会分泌纤维素酶、

半纤维素酶、果胶酶等^[57]，可水解 IDF 的多糖链，使其大分子结构断裂为小分子，更易溶于水。LAB 发酵过程中产生的酸性物质如乳酸等，会使发酵体系的 pH 值降低。在酸性环境下，IDF 的结构会发生变化，分子间的氢键、离子键等相互作用被削弱，导致膳食纤维的聚集状态被破坏，结构变得更加松散。这种结构的改变增加了膳食纤维与水分子的接触面积，使其更容易溶解，从而促进了 IDF 向 SDF 的转化，发酵过程还会消耗糖类、蛋白质等杂质，减少对膳食纤维的包裹与干扰，提升 SDF 纯度与产率。

BN 发酵或者 LAB 和 BN 联合发酵 IDF 会使 SDF 产率降低的原因可能是 BN 发酵或者 LAB 和 BN 联合发酵 IDF 时，BN 产生的酶，像纳豆激酶^[75]，可能过度酶解 IDF，不仅转化为 SDF，还进一步降解成单糖或寡糖等小分子，减少 SDF 生成量，并且其酶特异性可能破坏 IDF 中可转化为 SDF 的结构。在发酵过程中，pH 值的波动变化可能会抑制与发酵相关的酶的活性，还可能引发一些不利于 SDF 形成的反应，比如导致发酵成分发生凝聚沉淀现象。联合发酵时 LAB 和 BN 竞争营养，影响生长代谢，减少转化酶产量；同时，它们产生的代谢产物可能相互抑制，干扰 IDF 向 SDF 的正常转化，最终致使 SDF 产率降低。因此，选择 LAB 作为发酵微生物最优，进一步研究微生物培养基对 SDF 产率变化的影响。

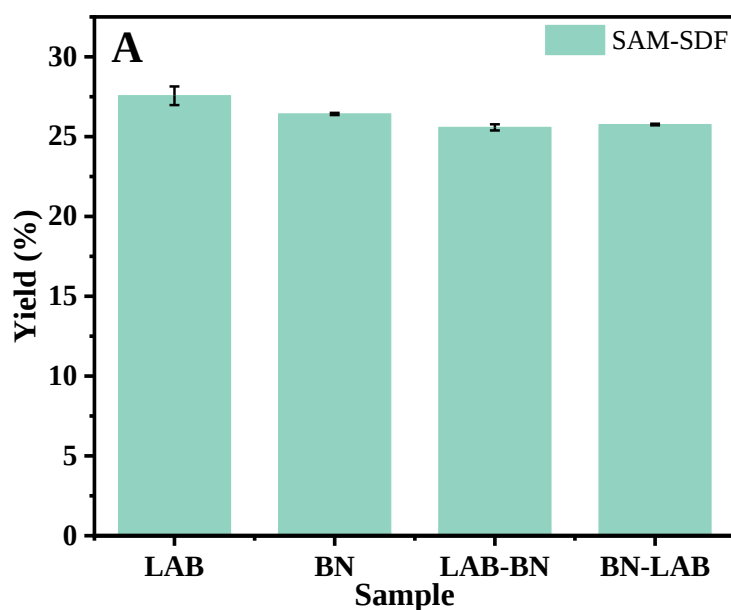


图 2-4 不同微生物及其发酵顺序对 SDF 产率的影响 (A)

Fig. 2-4 Effect of different microorganisms and their fermentation sequences on SDF Yield (A)

如图 2-5 (A) 所示, SDF 产量与培养基中的氮源呈正相关, 胰蛋白胨的含量为 6% 时产率增加到 28.28% 达到最高产率。这可能是由于 BSS 中的氮源较少, 又因为氮源是乳酸菌的重要营养物质, 添加适量氮源可以为其生长繁殖提供合成蛋白质、核酸等的原料, 使 LAB 数量增多, LAB 可以分泌淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和纤维素酶等多种细胞外酶, 这些酶在降解过程中发挥作用^[76], 研究发现, LAB 具有相当的糖基水解酶和碳水化合物降解能力^[77], 可以选择性地降解多糖。其次, 适量氮源可以维持酶的活性, 加快 IDF 分解转化为 SDF。再者, 氮源参与乳酸菌代谢, 能调节发酵液 pH 值至适宜范围, 还可使代谢产物与体系其他成分相互作用, 优化发酵环境, 利于 SDF 生成。最后, LAB 利用氮源代谢产生的物质可能改变 IDF 结构, 使其更易被酶解, 进而提高 SDF 产率。

在添加 6% 的氮源的基础上添加适量的碳源探究其对 SDF 产率的影响, 如图 2-5 (B) 和 (C) 所示, 以 SA-IDF 为发酵培养基和以 W-IDF 为发酵培养基的 SDF 的产率与碳源的关系相反, SA-IDF 为发酵培养基的 SDF 的产率与碳源呈负相关, W-IDF 为发酵培养基的 SDF 的产率与碳源呈正相关; 添加适量碳源后 SDF 产率下降, 其原因可能是因为碳源改变 LAB 代谢途径, 正常情况下, LAB 利用 IDF 发酵生成 SDF, 当添加碳源后, LAB 优先利用碳源进行代谢, 可能将更多能量与物质用于自身生长繁殖, 而非产生能将 IDF 转化为 SDF 的酶; 也可能是因为发酵环境失衡, 碳源代谢改变发酵液 pH 值与渗透压, 抑制酶活性, 干扰 LAB 正常代谢或与 IDF 结合改变其结构, 影响 IDF 转化为 SDF, 最终导致 SDF 产率降低。而 W-IDF 为发酵培养基时添加适量碳源可使 SDF 产率上升, 其原因可能是因为碳源为乳酸菌提供关键能源, 使其快速生长繁殖, 从而促使 LAB 分泌更多可降解 IDF 的酶, 如纤维素酶与半纤维素酶, 加速 IDF 向 SDF 的转化。同时, 部分碳源还可作为合成 SDF 的前体物质参与代谢, 增加 SDF 产量。此外, 碳源改变发酵体系性质, 让 IDF 结构松散, 暴露更多酶作用位点, 进一步提升 IDF 转化为 SDF 的效率。这两者对比从侧面验证了 SE 和 AE 处理后 BSS 在最大程度上将纤维素转化成 SDF, 以至于 LAB 不利用 IDF 作为碳源。因此。选择 6% 的胰蛋白胨作为发酵培养基的氮源最优。

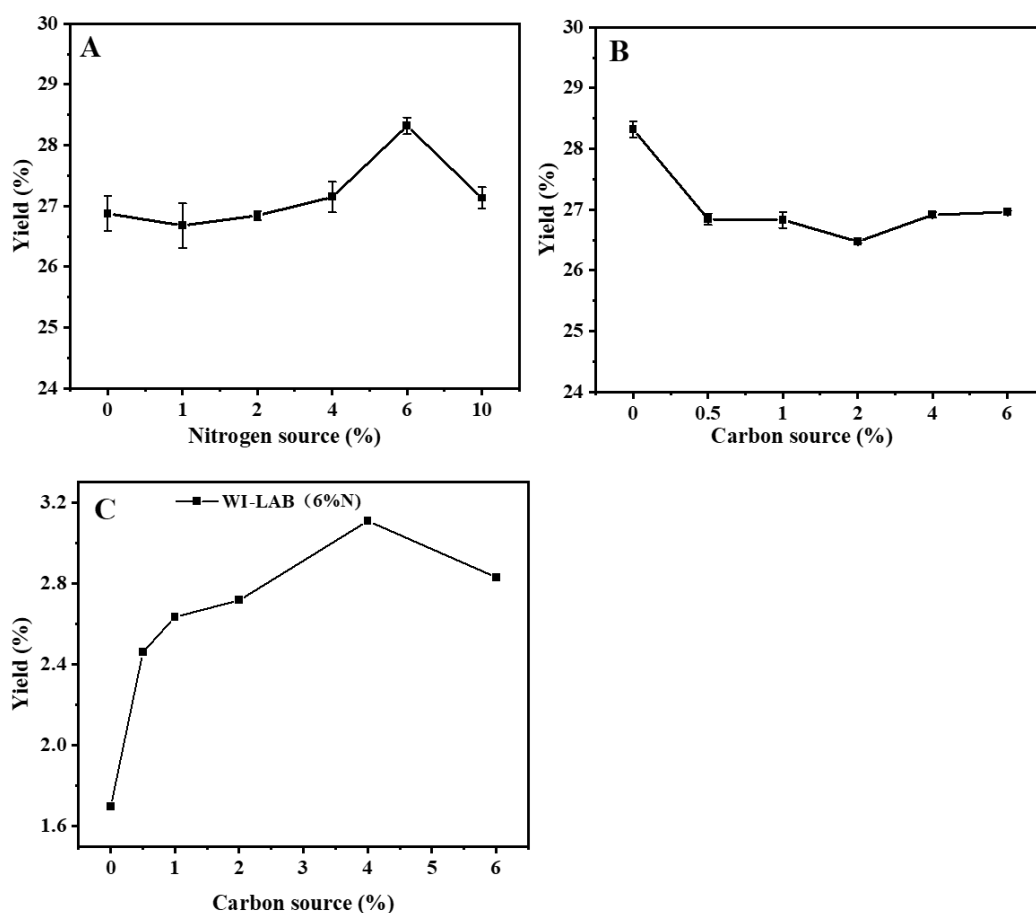


图 2-5 微生物发酵培养基氮源 (A)、碳源 (B) 和 WE 处理的 IDF 中碳源 (C) 的添加对 SDF 产量的影响

Fig. 2-5 Effects of nitrogen source (A), carbon source (B) in microbial fermentation medium, and carbon source (C) addition in WE-treated IDF on SDF yield

2.5.5 不同方法对 SDF 性能的影响研究

如图 2-6 (A) 和 (B) 所示, SDF 的 WHC、OHC 和 SC 会随着蒸汽爆破压力和时间的改变而发生变化。当蒸汽爆破压力增加时, 纤维结构受到强大的冲击力, 其内部孔隙结构会发生显著改变^[78]。一方面, 适当的压力使孔隙增多、增大, 比表面积增加, 这有利于 SDF 吸附水分和油脂, 还有可能是由于 SDF 三维结构的变化和短链膳食纤维用量的增加^[47], 使得 WHC 和 OHC 得以提升, 如图可得压力为 0.2 MPa 时 WHC 最高达 3.12 g/g, 0.6 MPa 时 OHC 最高达 5.70 g/g; 但另一方面, 压力过大则会破坏纤维的原有结构, 破坏孔隙, 进而使 WHC 和 OHC 降低, 如图 2-6 (A) 在时间为 3 min 的前提下压力在 1.0 MPa 时 WHC 最

低为 2.03 g/g, 0.8 MPa 时 OHC 最低为 4.90 g/g。同时, 压力的增加能够打破纤维中的氢键等作用力, 促使纤维分子链断裂, 分子聚合度降低, 从而提高了 SDF 的溶解率。随着蒸汽爆破时间延长, 纤维与蒸汽充分接触, 更多的亲水基团得以暴露, 使得 SDF 的 WHC 上升, 如图 2-6 (B) 可知, 在压力为 0.8 MPa 的前提下, 处理时间为 3 min 时 WHC 最高为 2.67 g/g。在这个过程中, 纤维结构不断发生变化, 为油脂分子提供了更多的吸附位点, 从而影响 OHC, 处理时间为 3 min 时 OHC 最高为 4.87 g/g 时。此外, 水解和降解反应也会随着时间的延长而不断进行, 降低纤维的结晶度, 提高 SDF 的溶解率。不过, 若时间过久, 纤维会过度降解, 生成一些不溶性的副产物, 或者纤维分子之间发生重新聚合等反应, 最终可能会导致 WHC、OHC 略有下降。所以气爆法在一定程度上改变了 SDF 结构, 导致持水性, 持油性和溶解率有所变化。

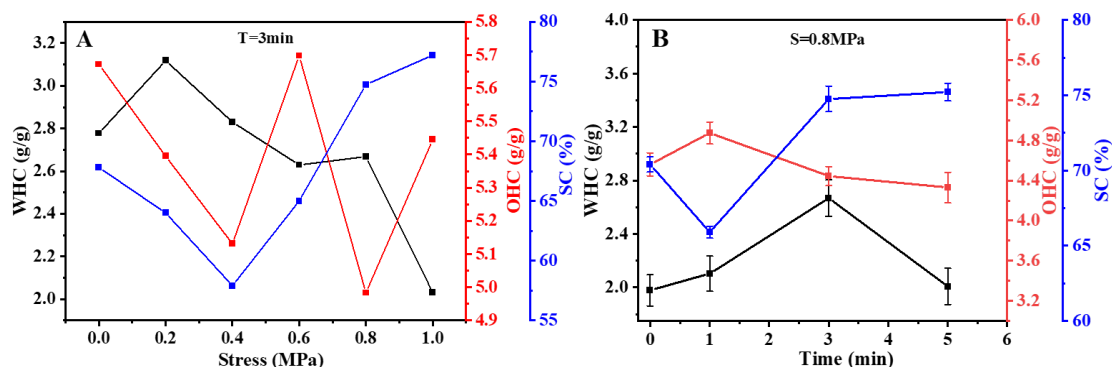


图 2-6 蒸汽爆破法处理压力 (A) 和处理时间 (B) 对 SDF 性能的影响。

Fig. 2-6 Effect of steam blasting treatment pressure (A and processing time (B) on SDF performance

图 2-7 (A) 和 (B) 所示, SDF 的 WHC、OHC 和 SC 都随着碱液的浓度和时间的变化而变化。碱液浓度较低时, WHC 和 OHC 较高, 如图 2-7 (A) 可得在处理时间 1 h 的前提下, 浓度为 0.75 mol/L 时 WHC 最高为 3.1 g/g, 0.5 mol/L OHC 最高为 4.54 g/g, 这可能是碱液可破坏膳食纤维分子部分结构, 分解成多孔结构和更小的粒径, 暴露出更多的亲水和亲脂性基团, 使原本被包裹的极性基团暴露, 这些极性基团能与水分子形成氢键这使得水和油分子易于渗透和吸收^[44], 从而显著提升 WHC 和 OHC。并且碱液打破了部分分子内和分子间的氢键, 降低了膳食纤维的聚合度, 分子量变小, 导致不能醇降解, 溶解率随之下降。然而, 当碱液浓度过高, 会对膳食纤维结构造成过度破坏, 不但使结合水的结构单元受

损, 导致 WHC 降低, 如在 1.0 mol/L 时 WHC 为 3.08 g/g; 高浓度碱还破坏了纤维表面疏水性区域, 致使 OHC 下降, 如在 1.0 mol/L 时 OHC 为 4.08 g/g。此外, 高浓度碱液易引发副反应, 如过度降解产生不溶性物质, 或使纤维发生交联, 这些都会降低溶解率。随着处理时间延长, 碱液与膳食纤维更充分的反应, 暴露出更多的亲水基团, 使 WHC 进一步提高, 如图 2-7 (B) 可知在碱浓度为 1 mol/L, 处理时间 1.5 h 时, WHC 为 3.1 g/g; 纤维结构持续变化, 形成更多利于油脂吸附的位点, OHC 提高, 处理时间 1 h 时, OHC 为 5.14 g/g; 又因为化学键不断断裂, 导致纤维结晶度降低, 溶解率得以提升。但倘若处理时间过长, 膳食纤维会过度降解, 分子链严重变短, 结构过度变化, 不仅难以保持水分和吸附油脂, 还会因过度降解或其他不利反应, 使 WHC、OHC 和 SC 均出现下降趋势。碱提在一定程度上改变了 SDF 结构, 导致持水性, 持油性和溶解率有所变化。

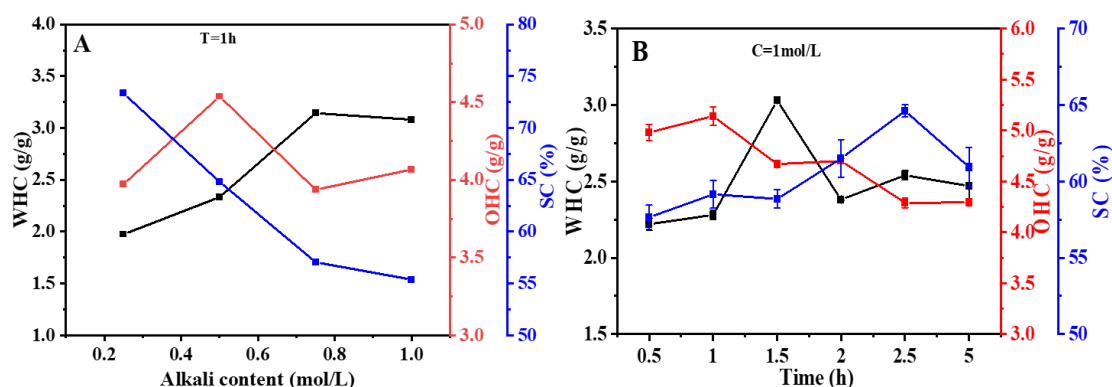


图 2-7 碱处理的碱含量 (A) 和处理时间 (B) 对 SDF 性能的影响

Fig. 2-7 Effect of alkali content (A) and treatment time (B) on SDF performance of alkali treatment

2.6 本章小结

本章主要研究了蒸汽爆破法、碱法、微生物发酵法、一步法和两步法等不同处理条件对竹笋壳 SDF 产量及其性能的影响, 探索了最优工艺, 具体如下:

(1) 方法比较: BSS 经过碱处理相比于水处理和酸处理, 碱提法提取 SDF 的产率最高为 9%, 是水提法的 2.8 倍, 酸提法的 1.8 倍。化学法和微生物法结合制备 SDF 时, 两步法制备 SDF 的产率相较于一步法产率明显提高, 可达 15% 左右, 可能是前期去除了碱预处理制备的 SDF 后, 微生物可利用 IDF 为底物发酵, 且

发酵过程中分泌的酶能高效降解复杂多糖，提升 SDF 的溶解性和生物利用度。

(2) 气爆法影响：SDF 产量随蒸汽爆破处理压力和时间的增加先升后降，因为适当的压力和时间可使细胞壁结构破裂，利于 SDF 提取，但过高压力和过长时间会导致膳食纤维分子链断裂、关键官能团破坏、结构致密化等问题，降低提取产率，因此选择处理条件在 0.8 MPa、3 min 时最适宜，产量最高为 15%。

(3) 碱提法影响：提取率变化：SDF 产率随碱处理浓度和时间增大而升高，在碱浓度为 1 mol/L、时间为 1.5 h 时产率最高，达 17%左右。之后产率渐趋平稳，原因可能包括反应平衡、原料可转化成分有限、膳食纤维结构稳定、副反应以及传质受限等。

(4) 微生物发酵提取方法研究：LAB 发酵 BSS 制备 SDF 的产率相较于 BN、BN-LAB 和 LAB-BN 发酵，其 SDF 产率最高为 27.5%，因此选择 LAB 作为发酵菌种，为了进一步提高 SDF 的产率，对发酵培养基进行优化发现胰蛋白胨含量为 6%时产率最高为 28.28%，碳源对 SDF 的产率没有促进的作用，所以确定 6%的胰蛋白胨为发酵培养基的最优氮源。为什么多方法耦合可以提高 SDF 的产量其机理是什么有待进一步研究，为下一章探索其机理做铺垫。

第3章 蒸汽爆破-碱法-微生物法提取竹笋壳 SDF 及性能改良方面的耦合作用研究

3.1 前言

膳食纤维（DFs）是植物来源的碳水化合物聚合物，可以逃避人体上消化道的消化和吸收^[54]。它分为 SDF 和 IDF。SDF 由可溶性半纤维素、果胶和低聚糖组成^[57]。SDF 通常用作功能性食品成分，由于其卓越的溶解性、持水/持油能力，可以降低血糖、血压和胆固醇水平^[64,79,80]。目前，SDF 已广泛用于缓解一些疾病，如糖尿病、肥胖、心血管疾病、高脂血症和结直肠癌^[81-83]。新鲜的竹笋在收获后会很快木质化^[16]。竹笋壳（BSS）富含纤维素、木质素和不溶性半纤维素，是 DF 的良好来源^[84]。然而，BSS 经常被丢弃在竹笋加工，造成大量资源浪费^[85,86]。本研究的目的是开发一种生产 BSS-SDF 的有效方法。提高植物 DF 中 SDF 的比例非常重要，从而提高 DF 的健康状况植物 DF 的潜力。

目前，一些物理方法已广泛应用于医药和食品的 SDF 生产中^[87]。这些方法比化学和酶法更便宜、更环保、更安全^[37]。特别是蒸汽爆破（SE）经常被用于加工农作物残留物和木质纤维素资源，其中 DF 的内部结构被蒸汽的高压和高温破坏和重新排列^[88]。SE 不仅可以提高 SDF 产量，还可以改善其功能特性^[89]。通常采用碱处理、酸处理和羧甲基化处理等化学方法获得的纤维具有多种结构和功能特性^[90]。具体来说，碱萃取^[79]（AE）有助于将微纤维与植物细胞壁分离^[91]，并且氢氧根离子（OH⁻）会破坏氢键的稳定性，使细胞壁结构松动。此外，氢氧根离子还会破坏氢离子键并进一步破坏半纤维素和纤维素之间的酯键，提高 SDF 产量^[92]。然而，这些方法通常对食物有害^[93]。与化学方法相比，微生物方法相对安全、高效、经济地生产高质量的 DF^[94]。乳酸菌可以产生各种酶，包括 β -葡萄糖苷酶，一种纤维素酶^[95]。 β -葡萄糖苷酶可以分解纤维素中的 β -1,4-糖苷键，形成更小的纤维二糖和葡萄糖分子，微生物可以将其用作碳源^[96,97]。另一方面，乳酸菌可以以 IDF 为碳源产生各种有机酸。这有助于将 IDF 酸性水解成 SDF。同时，在酸性条件更适合 IDF 降解^[97-100]。

已知协同应用各种方法可以提高 SDF 产量。超声辅助纤维素酶提取刺梨果渣可溶性膳食纤维，比原始的刺梨果渣含有的膳食纤维提高了 2.3 倍^[101]，这可能归因于联合处理条件有效地破坏了细胞壁的内部结构，从而提高了不溶性成分的转化率，促进纤维素分子之间的键松弛并将 IDF 转化为 SDF；超微粉碎和纤维素酶水解结合羧甲基化改性使谷糠 SDF 含量由原来的 1.04% 提高至 11.94%^[102]，这可能是因为经过超细研磨和纤维素酶水解后，小米麸皮膳食纤维中的一些糖苷键断裂，更多的亲水基团暴露出来，这有助于羟丙基、羧甲基和磷酸基团的引入，提高了 SDF 的产量及其性能。然而，多种方法提高 SDF 产量的机制尚不清楚。

在这项研究中，SE 最初用于模糊 BSS-SDF 的结构。随后，尽可能多的碱进入蓬松的结构，进一步破坏结构并释放更多的 SDF。相应的 IDF 用作乳酸菌发酵的底物。因此，产生的有机酸和酶进一步降解 IDF，生成具有可变特性的更小尺寸的 SDF。这探索了提高 BSS-SDF 产量的机制，以联合使用多种方法。希望这一发现将有助于开发 SDF 生产方法及其功能调控。

3.2 材料与仪器设备

3.2.1 材料

同 2.2.1

3.2.2 主要试剂

表 3-1 主要试剂

Table 3-1 Main reagents

药品名称	药品类型	药品来源
氯化钠	分析纯	国药集团试剂有限公司
牛肉浸膏	分析纯	国药集团试剂有限公司
葡萄糖	分析纯	国药集团试剂有限公司
蛋白胨	分析纯	国药集团试剂有限公司
MRS 培养基	分析纯	国药集团试剂有限公司
氢氧化钠	分析纯	国药集团试剂有限公司

盐酸	分析纯	国药集团试剂有限公司
胰蛋白胨	分析纯	国药集团试剂有限公司
溴化钾	CP	国药集团试剂有限公司

3.2.3 主要仪器

表 3-2 主要仪器

Table 3-2 Main instruments

仪器名称	型号	产地
电子天平	KFS-C	中国凯丰集团有限公司
超净工作台	SW-CJ-1F	苏州安泰空气技术有限公司
电热恒温干燥箱	202	北京科伟永兴仪器有限公司
振荡培养箱	BS-1E	常州国图电器有限公司
集热式恒温加热磁力搅拌器	DF-101S	邦西仪器科技（上海）有限公司
高压灭菌锅	SYQ-DSX-280B	上海申安医疗器械厂
超纯水机	LD-DI-15V	上海硕鼎水处理设备公司
Thermo酶标仪	Multiskan	北京海天友诚科技有限公司
移液枪8000-14000	20P、200P、1000P	法国 GILSO 公司
离心机	TG16-W 台式	湖南湘仪实验室仪器开发有限公司
真空冷冻干燥机	FD-1A-50+	博医康仪器有限公司
电热恒温水浴锅	HWS-24 型	山东千司科学仪器有限公司
精密试纸	pH5.5-9.0	上海三爱思 PH 试纸
pH 仪	YW-18W-A	上海亿世电器有限公司
汽爆工艺试验台	QBS-80	清正生态科技（苏州）有限公司

3.3 实验方法

3.3.1 BSS 预处理

用研磨机粉碎 BSS 碎片，然后通过 40 目筛子形成 BSS 粉末，保存在密封的袋子供使用。

3.3.2 水溶性 SDF (W-SDF) 的制备

根据已报道的方法(部分改进)^[103]通过水萃取(WE)提取 W-SDF。将 BSS 粉末与蒸馏水按质量比 1:20 混合。将混合物在 50℃下搅拌 1.5 h, 并以 4000 rpm 离心 10 min 以收集上清液和沉淀。将颗粒冷冻干燥成 W-IDF。将上清液在 90℃下使体积浓缩至 1/3。用 4 倍体积的 95%乙醇沉降, 并以 4000 rpm 离心 10 min。将沉淀物冻干成 W-SDF。

3.3.3 碱性溶解 SDF (A-SDF) 的制备

A-SDF 根据已报道的方法通过碱性萃取(AE)提取, 并进行了一些修改^[104], 将 BSS 粉末与不同浓度的 NaOH 溶液 (0-1 mol/L) 混合在 50℃下以 1:20 (质量/体积) 的比例不同时间 (30-300 min), 并以 4000 rpm 离心 10 min, 以收集上清液并沉淀。将沉淀冻干成 A-IDF。用上述方法将上清液干燥成 A-SDF。

3.3.4 蒸汽爆破/碱性溶解 SDF (SA-SDF) 的制备

SA-SDF 是通过 SE 和 AE 联合使用提取的。首先, 使用 SE 处理小的干净 BSS 块^[105], 具体来说, BSS 用 50℃的温水清洗, 然后在 70℃下放置至干燥。最后, 将干燥的 BSS 切成 2×2.5 cm² 的小块。将 BSS 片添加到蒸汽喷射器中, 在不同压力 (0.2-1.0 MPa) 下处理不同时间 (1-5 min), 然后捣碎成粉末, 最后通过 40 目筛子使用。其次, 将 SE 处理的 BSS 粉末与 1 mol/L NaOH 溶液以 1:20 (质量/体积) 的比例在 50℃下混合 1.5 h, 并以 4000 rpm 离心 10 min, 收集上清液并沉淀。沉淀物被冷冻干燥命名为 SA-IDF。用上述方法将上清液冷冻干燥, 其产物命名为 SA-SDF。

3.3.5 蒸汽爆破/碱溶/微生物发酵联合使用制备 SDF (SAM-SDF)

BSS 含有较少的蛋白质, 由于氮源短缺, 不利于微生物生长和新陈代谢。本研究在培养基中加入胰蛋白胨, 探讨氮源对微生物法的影响。在 SA-IDF (pH 6.5) 中加入 6% 胰蛋白胨, 作为培养基在 121℃下灭菌 15 min。接种 4 mL 乳酸菌种子液 (OD₆₀₀=0.4) 并在 37℃下孵育 48 h。发酵液过滤, 沉淀为 SAM-IDF。用上述方法处理上清液, 其干燥产物命名为 SAM-SDF。

3.3.6 SDF 产量的测定

SDF 产量是指根据报告的方法^[66]从 BSS 到 SDF 的转换百分比, 按如下公式计算 (3-1)

$$\text{SDF 得率 (\%)} = \frac{m}{M} * 100\% \quad (3-1)$$

其中，M 和 m 分别是所用 BBS 粉末的干重和相应的 SDF。

3.4 微生物发酵

3.4.1 pH 变化

测量发酵液的 pH 值，用 pH 计测其变化。

3.4.2 蛋白质含量和蛋白酶活性

使用改良的 Bradford 测定蛋白质含量方法与 Bradford 蛋白测定试剂盒 (C503041)。

根据中国国家标准 (GB/T 23527.1-2023) 使用 Folin 酚法测定蛋白酶活性，并稍作修改。根据中国国家标准 (GB/T 23527.1-2023) 使用 Folin 酚法测定蛋白酶活性，并稍作修改。具体来说，将 1 mL 样品和 1 mL 2% 酪蛋白溶液在 40°C 下预热 2-3 min，向样品中加入 2 mL 0.4 mol/L TCA 溶液，在 40°C 下放置 10 min。然后，在上述混合物中加入 1 mL 2% 预热的酪蛋白溶液，充分摇匀，静置 10 min，作为对照组。相应地，将 1 mL 样品和 1 mL 2% 酪蛋白溶液在 40°C 下预热 2-3 min，然后混合并在 40°C 下放置 10 min。然后，向混合物中加入 2 mL 0.4 mol/L TCA 溶液，充分摇匀，室温静置 10 min，作为实验组。将 1 mL 对照和 1 mL 实验组分别与 5 mL 0.4 mol/L 碳酸钠溶液和 1 mL 苯酚试剂混合，在 40°C 下放置 20 min。最后，使用 ELISA 读数仪分别在 680 nm 处测量它们的吸光度值为 O_c 和 O_e ，1 U/mL 蛋白酶是指 1 mL 蛋白酶在 40°C 下，1 min 内将酪蛋白水解成 1 μ g 酪氨酸的酶活性。蛋白酶活性 (A_p) 由公式 (3-2) 确定。

$$A_p(U/mL) = \frac{[161.3 \times (O_e - O_c) - 8.4] \times v}{t} \quad (3-2)$$

其中，v 和 t 分别表示反应体积 (mL) 和反应时间 (min)。161.3 和 -8.4 分别为酪氨酸标准曲线的斜率和截距。

3.4.3 纤维素酶活性

使用 DNS 方法 (中国国家标准: GB 7300.4032022) 测定纤维素酶活性，并稍作修改。具体而言，将 1 mL 对照 (蒸馏水)、1 mL 样品和两个 4 mL 1% CMC-Na 溶液在 50°C 下预热 2 min。然后，将对照和样品分别与 CMC-Na 溶液充分混

合。将混合物在 50°C 下放置 5 min，然后立即在上述混合物中加入 1 mL 2 mol/L NaOH 溶液和 2 mL NS 试剂并充分摇匀。将混合物置于 100°C 下 3 min，并在室温下稀释至 20 mL，在 540 nm (A_{540}) 处进行测定，对照进行基线校正。1 U/mL 纤维素酶是指 1 mL 纤维素酶水解 CMC 的酶活性在 50°C 下在 1 min 内将 1 μ mol 葡萄糖转化为 1 μ mol 葡萄糖。纤维素酶活性 (A_c) 由方程 (3-3) 测定。

$$A_c(U/mL) = \frac{(0.42 \times A_{540} + 0.02) \times v \times n \times 1000}{180.16 \times t} \quad (3-3)$$

其中， v 、 t 和 n 分别表示反应体积 (mL)、反应时间 (min) 和反应体系的稀释倍数。0.42、0.02 和 180.16 分别为葡萄糖校准曲线的斜率和截距，以及葡萄糖的分子量。

3.5 SDF 的表征

3.5.1 溶解度

根据以前的方法测定 SDF 的溶解度^[66]。将 BSS-SDF (0.1 g) 与 10 mL 蒸馏水混合，并在室温下放置 1 h。将混合物以 4000 rpm 离心 10 min，收集沉淀，冷冻干燥，称重。SDF 的溶解度 (Solubility) 由公式 (3-4) 计算。

$$Solubility (\%) = \frac{w_2 - w_1}{w_2} * 100\% \quad (3-4)$$

其中， w_1 (g) 和 w_2 (g) 分别表示未溶解的 SDF 和总 SDF 的权重。

3.5.2 流变学测定

使用报道的方法测定 SDF 流变学^[64]进行测定，并稍作修改。使用流变仪 (Fluidi CAM Rheo, 法国) 在 25°C 下以 1000 至 4000 s^{-1} 的剪切速率 10 mL 2 mg/mL SDF 样品进行分析。

3.5.3 扫描电子显微镜 (SEM)

通过 10 kV 扫描电子显微镜 (S-4800, 日本日立) 观察 SDF 样品的表面和微观结构。所有样品均用双面导电胶带固定在铝制样品架上，在真空下溅射一层金薄膜 30 s。

3.5.4 傅里叶变换红外光谱 (FTIR)

在 45°C 下干燥 12 h 后，将 SDF 样品与干燥的溴化钾以 1:100 (w/w) 的比例研磨，并压制成片剂，以 4 cm^{-1} 分辨率在 400-4000 cm^{-1} 的波数范围内收集 FTIR

光谱 (Shimadzu IRPrestige-21, 日本京都)。

3.5.5 X 射线衍射 (XRD)

使用 X 射线衍射仪 (Smartlab SE, 日本) 在 40 kV 和 50 mA 下以 2°/min 的扫描速度在 5-50°下测定 SDF 的晶体特性。根据先前方法^[106], SDF 的结晶度使用公式 (3-5) 确定。

$$Crystallinity (\%) = \frac{IA_c}{IA_c + IA_a} \times 100\% \quad (3-5)$$

其中, IA_c 和 IA_a 分别是结晶区和非晶区的积分区。

3.5.6 TGA 检测

使用热重分析仪 (TG209, 德国) 在 20 mL/min 的 N_2 和 30-700°C 的 10°C/min 条件下对 BSS-SDF 进行热重分析 (TGA)。使用 OriginPro 9.0 通过区分 TGA 曲线获得导数热重分析 (DTG) 曲线。

3.6 SDF 性能

3.6.1 持水能力 (WHC)

将 0.5 g SDF 样品与 10 mL 蒸馏水在 37°C 下充分混合 1 h, 并将混合物以 4000 rpm 离心 15 min。除去上清液, 称取湿沉淀物, 称量为 W_w 。SDF 的 WHC 由公式 (3-6) 计算。

$$WHC (g/g) = \frac{W_w - 0.5}{0.5} \quad (3-6)$$

3.6.2 持油能力 (OHC)

将 0.5 g SDF 样品与 10 mL 葵花籽油在室温下混合 2 h, 并将沉淀物以 4000 rpm 离心 30 min。除去上清液, 称取湿沉淀物, 按 W_o 。SDF 的 OHC 由公式 (3-7) 计算。

$$OHC (g/g) = \frac{W_o - 0.5}{0.5} \quad (3-7)$$

3.6.3 葡萄糖吸附能力 (GAC)

根据报道方法略有修改^[107], 将 0.5 g SDF 样品与 50 mL 100 mmol/L 葡萄糖溶液混合, 并在 37°C 下孵育 6 h。将混合物以 4000 rpm 离心 20 min。使用 DNS 比色法测定溶液中 SDF 吸附的葡萄糖含量为 C_a 。SDF 的 GAC 由公式 (3-8) 计算。

$$\text{GAC (mmol/g)} = \frac{50 \times (100 - C_a)}{1000 \times 0.5} \quad (3-8)$$

3.6.4 抗氧化能力

使用报告的方法测定 DPPH·自由基清除活性 (DPPH SC), 并稍作修改^[108]。简单来说, 将 1 mL SDF 溶液和 1 mL 蒸馏水与 3 mL 0.16 mmol/L DPPH 溶液混合均匀, 命名为样品组和空白组。将 1 mL SDF 溶液与 1 mL 无水乙醇充分混合, 无水乙醇作为对照组。将三种混合物在室温下避光放置 30 min。在 517 nm 处测定样品、空白和对照组, 分别获得 A_s 、 A_b 和 A_c 的吸附值。SDF 的 DPPH SC 由公式 (3-9) 计算。

$$\text{DPPH SC (\%)} = \left(1 - \frac{A_s - A_c}{A_b}\right) \times 100 \% \quad (3-9)$$

使用报道的方法测定 ABTS+自由基清除活性 (ABTS SC), 并稍作修改^[108]。将 200 mg ABTS 和 34.4 mg 过硫酸钾加入 50 mL 蒸馏水中, 混匀, 室温避光放置 24 h, 视为 ABTS 母液。然后, 将其稀释至适当浓度 ($\text{OD}_{734} = 0.70 \pm 0.02$) 作为工作溶液。将 0.4 mL SDF 溶液和 0.4 mL 蒸馏水与 3.6 mL ABTS 工作液分别混合均匀, 命名为样品组和空白组。将混合物在室温下避光放置 5 min。在 734 nm 处测定样品和空白组, 分别获得 A_s 和 A_b 的吸附值。SDF 的 ABTS SC 由公式 (3-10) 计算。

$$\text{ABTS SC (\%)} = \frac{A_b - A_s}{A_b} \times 100 \% \quad (3-10)$$

3.6.5 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 法测定 SDF 样品的总酚含量 (TPC)。首先, 将 2.5 mL 0.1 M Folin-Ciocalteu 试剂与 0.5 mL SDF 样品充分混合, 并在黑暗中放置 5 min。在混合物中加入 2 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液, 并在黑暗中放置 60 min。在 765 nm 处测定混合物以获得 A_{765} 的吸附值。SDF 的 TPC 由公式 (3-11) 计算。

$$\text{TPC (mg/mL)} = (0.14 \times A_{765} - 0.0093) \times n \quad (3-11)$$

其中, n 表示样品的稀释倍数。数据 0.14 和 -0.0093 分别为没食子酸标准曲线的斜率和截距。

3.6.6 总黄酮含量的测定

SDF 样品的总黄酮含量 (TFC) 使用报告的比色法进行测定, 稍作修改^[109]。简而言之, 将 0.7 mL 5% NaNO_2 溶液、0.7 mL 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液和 10 mL SDF

溶液充分混合，并在室温下放置 6 min。在混合物中加入 5 mL 10% NaOH 和 8.6 mL 80% 乙醇，充分混合，并在室温下放置 15 min。在 510 nm 处测定混合物以获得 A_{510} 的吸附值。SDF 的 TFC 由公式 (3-12) 计算。

$$\text{TFC (mg/mL)} = (0.3 \times A_{510} - 0.014) \times n \quad (3-12)$$

其中， n 表示样品的稀释倍数。0.3 和 -0.014 的数据分别为芦丁标准曲线的斜率和截距。

3.7 结果与讨论

3.7.1 BSS-SDF 产量演变过程

从 BSS 中提取 SDF 的不同方法的流程图如图 3-1 (A) 所示。AE 经过优化，使用 1 mol/L NaOH 持续搅拌 1.5 h 时获得 17% 的最高产量，是 WE 的 7.2 倍。基于优化的 AE，在 0.8 MPa，3 min 进行最佳 SE 处理，以获得最高的 SA-SDF 产率，产率提高到 23%。在 SE 中，瞬时爆发的蒸汽产生强大的剪切力，打破连接纤维素、半纤维素和木质素的糖苷和氢离子键，将纤维素降解成小分子，将 IDF 转化为 SDF^[110]。AE 和 SE 的联合使用产生了多种影响，包括热降解、机械断裂和氢键断裂，破坏了细胞壁，增加了溶剂的可及性，并提高了 SDF 的提取效率^[111]。随后，对 ME 进行了系统研究。根据之前的研究，一步法提取 SDF 时底物中的 SA-SDF 可被乳酸菌耗尽。因此，为了提高 SDF 的产率，实验选择 SA-IDF 作为发酵底物参与后续反应，经研究发现，利用乳酸菌对其进行发酵时，能够达到 5% 的最高产量。众所周知，乳酸菌可以产生有机酸和葡萄糖苷酶，这与纤维素水解密切相关，进一步将 IDF 分解成 SDF^[57]。ME 中的 SDF 生产可以进行酶水解和酸性水解的两步水解^[95,97-100]。最后，通过结合使用 SE、AE 和 ME 获得了 28.28% 的总产量如图 3-1 (B) 所示，远高于小麦 SDF 的 12.37% 和亚麻籽饼 SDF 的 10.11%^[112,113]。

S1、S2、S3 和 S4 分别指 W-SDF、A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF。S5 是由 S3 和 S4 组成的混合物。所有值均显示为均值 ± 标准差 ($n=3$)。列上的不同字母表示在 $p<0.05$ 处存在显著差异 (下同)

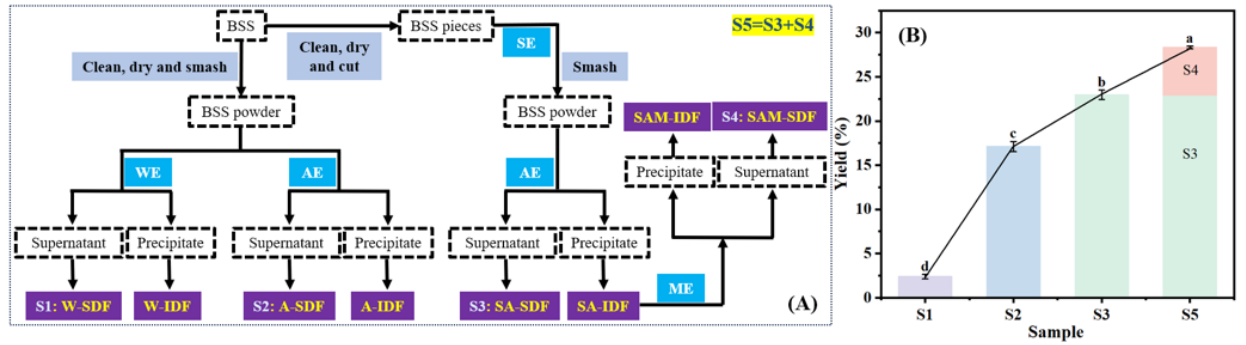


图 3-1 从 BSS 中提取 SDF 的不同方法的流程图 (A) 和相应的产量 (B)

Fig. 3-1 Flow diagram of different methods for extracting SDF from BSS (A) and corresponding yield (B)

3.7.2 BSS-SDF 的结构演变

SDF 表面微观结构的演变如图 3-2 (A) 所示。BSS 粉末具有较大的固体结构, 经 WE 处理形成具有完整条带结构的 W-IDF。BSS 粉末经 AE 处理, 形成具有鱼鳞覆盖层状结构的 A-IDF。相应地, 碱性溶液对 BSS 结构具有明显的解构作用。BSS 先后经 SE 和 AE 处理形成 SA-IDF。A-IDF 中原有的分层结构被进一步破坏, 表明 SE 和 AE 的联合使用对 BSS 结构造成了更强的破坏。SA-SDF 的尺寸可能比 A-SDF 小, 这是合理的。在组合使用中, SE 中突然而强大的剪切力导致稀疏和多孔结构可用于碱性溶液进入, 从而提高了水解能力。SA-IDF 被 ME 进一步降解, 形成最小尺寸的 SAM-SDF。如图 3-2 (B, C) 所示, SE、AE 和 ME 的联合使用实现了最高的 SDF 溶解率, 其次是 SA、AE 和 WE。同样, W-SDF 的粘度最高, 其次是 A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF。这可能是由于 AE 暴露了更多的极性基团, 以促进 SDF 分子和溶剂之间的静电相互作用, 从而增加流动阻力^[114]。一般来说, 粘度与分子大小呈正相关, 因为分子越大, 分子链缠结越强, 分子间作用力越强^[115]。据推测, SAM-SDF 的尺寸最小, 其次是 SA-SDF、A-SDF 和 W-SDF。因此, SE、AE 和 ME 的联合使用对破坏 BSS 的结构具有协同作用, 增加了 SDF 产量, 但减小了 SDF 的大小。

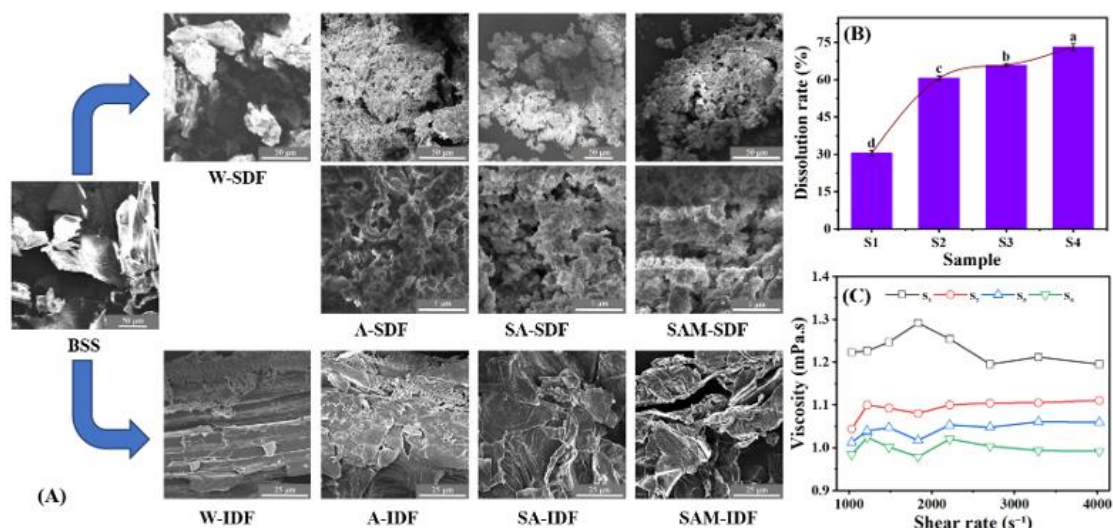


图 3-2 不同竹笋壳粉的 SDF 样品的扫描电子显微镜 (A)、溶解度 (B) 和粘度 (C)

Fig. 3-2 Scanning electron microscopy (A), solubility (B) and viscosity (C) of SDF samples of different bamboo shoot shell powders

如图 3-3 (A) 所示, SDF 样品的 FTIR 光谱在 $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 范围内, 它们的特征峰相似, 但特征带的强度不同。所有样品的宽峰都在大约 3400 cm^{-1} 处, 这主要归因与多糖的羟基相关的氢离子键的振动。A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF 在 3400 cm^{-1} 左右的峰值强度上显著低于 W-SDF, 并且与 W-SDF 相比, 它们的波数偏移 to 更高的波长。这可能是由于 SE、AE 和 WE 通过破坏氢键来降解纤维素和半纤维素, 形成新的无定形纤维素和可溶性糖, 从而暴露出更多具有游离羟基的官能团^[116]。 2918 cm^{-1} 处的峰与甲基或亚甲基的化学基团 C-H 振动有关。SDF 样品的峰具有显著偏移, 表明释放了一些多糖化合物^[117,118]。 1643 cm^{-1} 的峰对糖醛酸的 C=O 或 COO- (羧基官能团) 的振动做出反应^[119]。SDF 样品的光谱发生了条带的偏移和强度, 表明形成了更多的糖醛酸基团, 并且更多的木质素分子被降解。 1416 cm^{-1} 处峰的变化可能是由 C-H 的可变角度振动引起的^[120], 1049 cm^{-1} 处峰的变化可能是由于 C-O-C 和 C-O-H 的混合拉伸振动, 主要来自半纤维素和纤维素^[120]。结论可得, 提取方法改变了 SDF 的结构构象。此外, SDF 样品在 896 cm^{-1} 处有一个共同峰, 对应的是 β -糖苷键的振动^[121]。相对于 A-SDF 和 SA-SDF, SAM-SDF 在 896 cm^{-1} 处具有较弱的峰, 这表明 ME 中的一些纤维素酶被合成以水解 β -糖苷键, 从而削弱了峰的振动。

如图 3-3 (B) 所示, 不同的提取方法对改变 SDF 样品的晶体结构有不同的

影响。在所有样品的模式中，在大约 21.7°处观察到一个共同的宽峰，表明存在 I 型纤维素^[122]。特别是 A-SDF 和 SA-SDF 的峰较宽，表明 AE 和 SE 对 BSS 天然晶体结构的解构程度更高。与 W-SDF 相比，A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF 样品在 27.2°、31.5°和 45.2°处具有多个尖峰，W-SDF 的结晶度最低为 4%，可能是因为它主要以无定形形式存在。SE、AE 和 ME 降低了 SDF 的分子大小，尤其是 ME 实现了 SDF 的最小尺寸，最高结晶度为 9.7%。在 ME 中，蛋白酶和纤维素酶分别水解蛋白质和半纤维素，暴露出更多的纤维素结晶区域^[123]。此外，结晶还与分子构象有关^[124]。SE 和 AE 的联合使用增加了 SDF 构象的复杂性以抑制结晶，导致 SA-SDF 的结晶度低于 A-SDF。

结晶度较高的纤维素通常具有较好的热稳定性，因为结晶区具有规则的分子链排列、强大的分子间作用力以及破坏其结构所需的较高能量。SAM-SDF 具有最高的结晶度，对应于最佳的热稳定性。对所有样品的热稳定性均进行了研究，在温度阶段（50-200°C、200-400°C和 400-600°C）观察到三种明显的重量损失，如图 3-3（C-D）所示，在第一个温度阶段（50-200°C）由于游离水和结合水的损失，样品重量损失了约 14%。所样品在 200-400°C温度下都有明显的重量损失，这一部分主要是多糖链的断裂导致第二次重量减轻^[125]，表明了糖的热分解和挥发性产物的消除^[119]；SAM-SDF 在 200-400°C的损失最小，表明一些化学键（如糖苷键）在 ME 中被水解；400-600°C是重量损失的最后阶段，这一部分的重量损失是由化学键的组分（木质素化合物）的热分解导致的^[126]，并且在图 3-1（B）所示，其中 A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF 没有像 W-SDF 那样的尖峰，这表明木质素等大部分成分已被 SE、AE 和 ME 破坏。综上所述，SEM-SDF 的热稳定性最好，其次是 SA-SDF、A-SDF 和 W-SDF，它们表现出与溶解速率、粘度和结晶度相同的变化趋势，证明了 SE、AE 和 ME 对 BSS 结构有破坏性影响，特别是它们的组合使用。

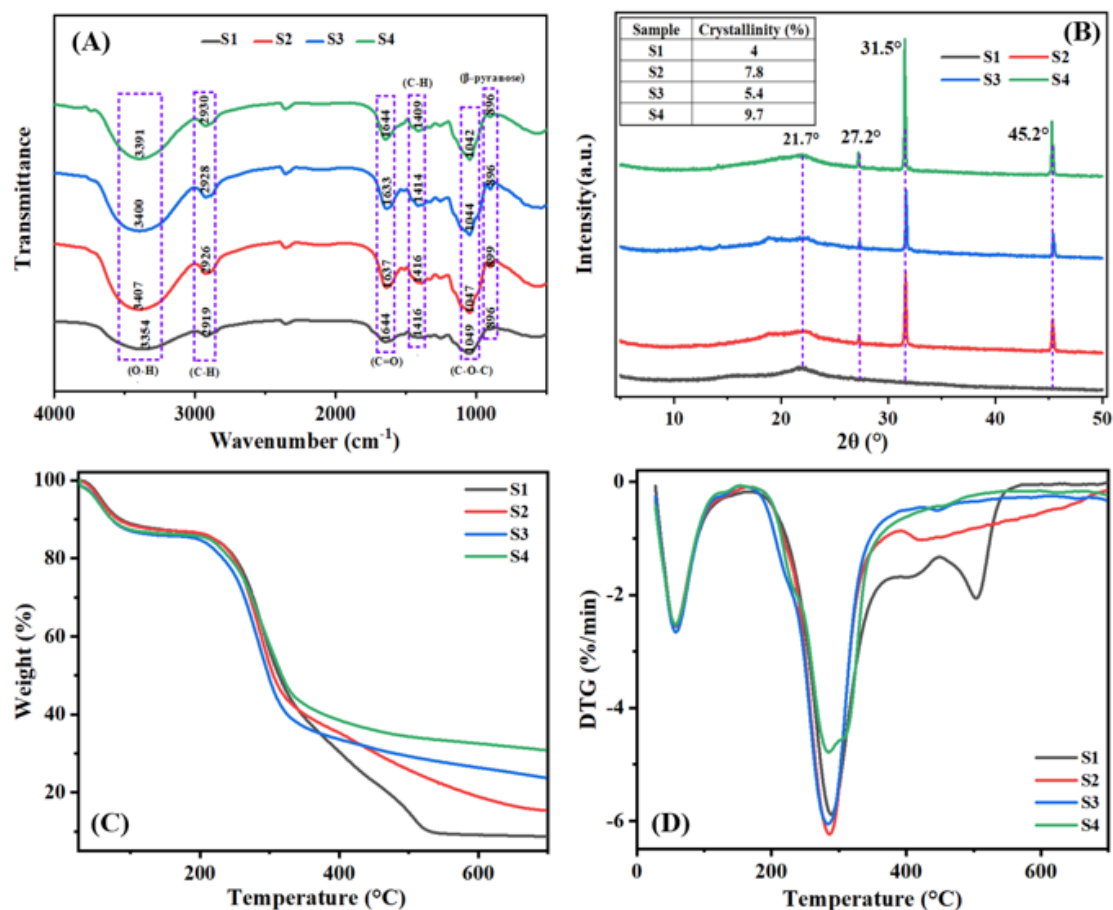


图 3-3 SDF 样品的 FTIR (A)、XRD (B)、TGA (C) 和 DTG (D)

Fig. 3-3 FTIR (A), XRD (B), TGA (C), and DTG (D) of SDF samples

3.7.3 BSS-SDF 性能演变

BSS 结构通过不同的提取方法被破坏,形成具有不同结构特征的 SDF 样品,并且表现出不同的性质。先后研究了 SDF 吸附能力 (OHC、WHC 和 GAC) 和抗氧化能力 (DPPH 和 ABTS 清除能力)。如图 3-4 (A) 所示, W-SDF 在 OHC 和 OHC 方面比其他 SDF 样品具有更高的能力,是因为结构没有损坏。据报道, OHC 不仅取决于 DF 的总电荷密度、粘度和厚度,还取决于纤维颗粒上亲水和疏水基团的存在^[127]。通过水溶解获得 A-SDF、SA-SDF 和 SAM-SDF, SDF 分子表面暴露更多的亲水基团以降低 OHC。

BSS 依次用 SE、AE 和 ME 处理,相应的 SDF 的 WHC 降低。这可能是由于亲水基团和 SDF 结构的变化。SE、AE 和 ME 的联合使用导致 SDF 尺寸更小,并破坏了 DF 的分子结构。较小的 SDF 在表面拥有更多的亲水基团,对游离

水表现出更高的亲和力。同时,受损的结构失去了大部分的持水能力。另一方面,尺寸较小的 SDF 具有更高的比表面积,吸附更多的游离水。此外,WHC 与 TDF 量和 IDF/SDF 的比率有关,后者与 SDF 含量呈负相关^[128],这可能是 W-SDF 具有最低 WHC 的原因之一。对于 GAC 而言,A-SDF 和 SA-SDF 优于 W-SDF 和 SAM-SDF,这可能归因于 SDF 的结晶度和分子大小;SAM-SDF 具有最高的结晶度,可防止葡萄糖分子进入 SDF 内部,从而降低 GAC;W-SDF 具有最低的比表面积,暴露的吸附位点最少,并降低了 GAC。SE 和 AE 产生蜂窝网络结构,增加 GAC 并减慢葡萄糖分子的扩散速率,有利于延缓胃肠道对葡萄糖的吸收,抑制餐后血糖的升高^[129]。图 3-4 (B) 显示了从每克 BSS 获得的 SDF 在 OHC、WHC 和 GAC 中的吸附能力。研究发现,SE、AE 和 ME 的联合使用实现了最高的 SDF 产率,在 OHC、WHC 和 GAC 中表现出最高的累积吸附能力。

羟基自由基和生物大分子之间的相互作用可能导致与氧化应激相关的疾病^[130]。SE 和 AE 可以提高 BSS-SDF 的抗氧化能力。图 3-4 (C) 所示,ABTS+和 DPPH 的最佳清除能力分别达到 87%和 74%。因此,相应的 SDF 产品可用于通过饮食护理来缓解疾病。图 3-4 (D) 所示,表明 A-SDF 和 SA-SDF 中的总酚和类黄酮含量高于 W-SDF 和 SAM-SDF。木质素具有芳香环,通过与类黄酮相同的途径合成,破坏可能会释放或暴露一些连接或嵌入基质结构中的酚类化合物^[131]。因此,木质素分子被 SE 和 AE 分解,将酚类和类黄酮释放到 SDF 溶液中,从而提高抗氧化能力。此外,SAM-SDF 的抗氧化能力低于 A-SDF 和 SA-SDF,可能是因为类黄酮和酚类化合物的消耗。

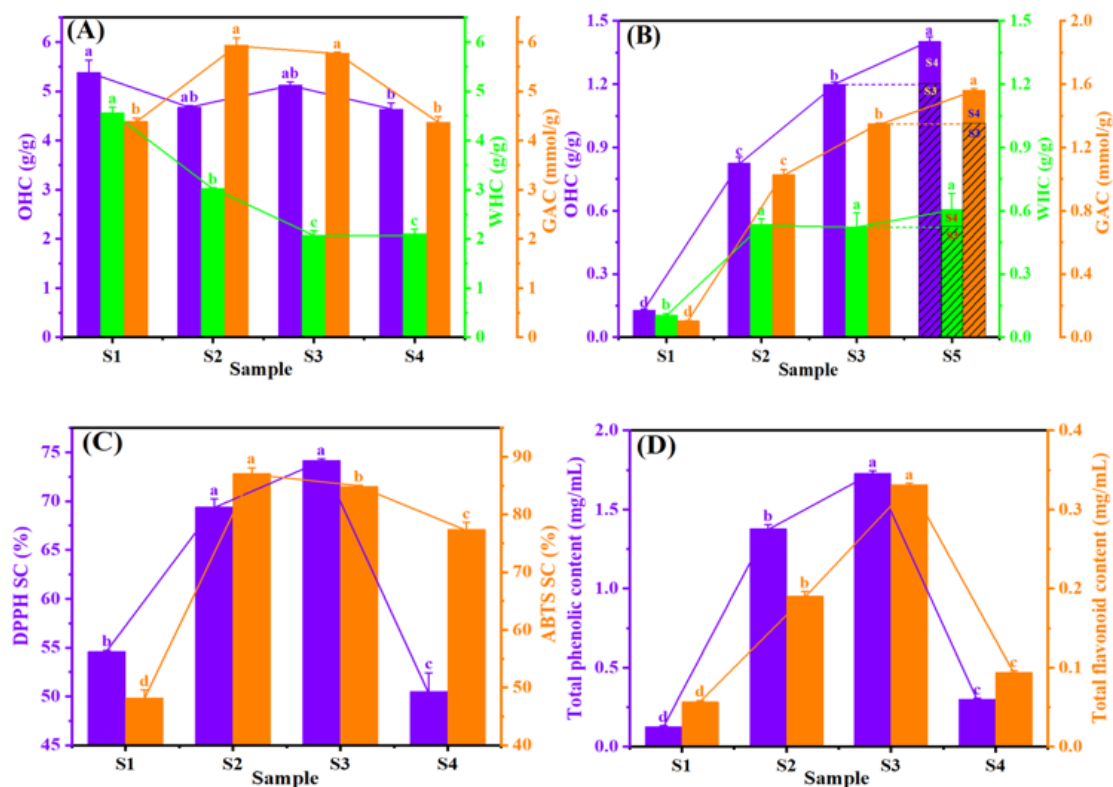


图 3-4 SDF 样品的特性：每克 SDF 的 OHC、WHC 和 GAC (A)；从每克 BSS (B) 获得的 SDF 的 OHC、WHC 和 GAC；SDF 样品的体外抗氧化能力，包括 DPPH SC 和 ABTS SC (C)；总酚含量和总类黄酮含量 (D)

Fig. 3-4 Characteristics of SDF samples: OHC, WHC, and GAC per gram of SDF (A); OHC, WHC, and GAC of SDF obtained from each gram of BSS (B); In vitro antioxidant capacity of SDF samples, including DPPH SC and ABTS SC (C); Total phenolic content and total flavonoid content (D).

3.7.4 微生物发酵过程参数变化

如图 3-5 (A) 可知，乳酸菌发酵制备竹笋壳可溶性膳食纤维，发酵过程中 pH 先上升后下降，初期上升可能是因为在发酵培养基中加入 6% 的氮源，并且在发酵过程中培养基中的有机氮源（如蛋白质、氨基酸等）被乳酸菌分解。在这个过程中，部分氨基酸可能通过脱氨基作用产生氨等碱性物质，使发酵液中的碱性物质积累，pH 上升。在发酵初期，乳酸菌处于适应期和对数生长期前阶段，此时菌体数量相对较少，代谢活动主要是利用培养基中的营养物质进行自身的生长和繁殖。在这个过程中，产生的酸性代谢产物较少，而前面提到的氮源代谢产生

的碱性物质占主导地位,所以 pH 持续上升。随着发酵进行到 24 h 左右,乳酸菌的生长和代谢活动逐渐达到一个相对平衡的状态。此时,碱性物质的产生和积累达到了一个峰值,同时酸性物质的产生还未大量增加,使得 pH 达到最大值。24 h 之后,乳酸菌进入对数生长期后期和稳定期,菌体数量大量增加,代谢活动旺盛,开始大量产生乳酸等酸性物质。随着乳酸等酸性物质的不断积累,发酵液中的氢离子浓度逐渐升高, pH 开始下降^[132],大量有机酸积累,导致体系 pH 迅速下降。有研究在乳酸菌发酵小麦面团时发现^[133],乳酸菌会产生乳酸,导致 pH 值并且可延长食品保质期。乙酸是酵母菌和乳酸菌的代谢产物。它还有助于面包的味道并降低面团的 pH 值,限制不需要的微生物群落的生长。虽然几乎所有的乙醇在烘烤过程中都会蒸发,但它对发酵后的面团质地有有益的影响^[134]。当 pH 下降到一定程度时,会对乳酸菌的生长和代谢产生抑制作用,使得酸性物质的产生速率逐渐减缓,但总体上酸性物质的积累仍在继续,导致 pH 持续降低。

如图 3-5 (B) 可知蛋白含量先下降后上升再下降。初期下降可能是因为乳酸菌发酵产生的蛋白酶等酶类开始发挥作用^[135],将竹笋壳中的蛋白质分解为小分子肽和氨基酸,导致检测到的蛋白含量下降。并且,乳酸菌生长繁殖需要氮源,会利用部分分解产生的氨基酸等含氮物质用于自身细胞构建和代谢活动,进一步降低体系中蛋白含量。中期上升:随着发酵深入,竹笋壳细胞壁在乳酸菌及其产生的酶如在纤维素酶、半纤维素酶的作用下逐渐被破坏,原本包裹在细胞内的蛋白质释放到发酵体系中,使得蛋白含量有所上升。同时,乳酸菌自身细胞数量增加,其细胞内含有一定量蛋白质,随着细胞的增殖,也会使体系中蛋白含量上升。后期下降:发酵后期,乳酸菌进入衰亡期,代谢活动减弱,菌体自溶,细胞内的蛋白质等物质释放到环境中,但此时体系中的蛋白酶活性虽降低但依然存在,会进一步将这些释放的蛋白质和前期未完全分解的蛋白质继续水解为小分子物质,同时乳酸菌对这些小分子含氮物质持续利用,最终导致蛋白含量再次下降。

如图 3-5 (C) 可知,蛋白酶逐渐下降可能是因为酶的消耗与失活,蛋白酶在催化蛋白质水解过程中,自身会不断消耗,随着发酵进行,其含量自然逐渐减少。而且,发酵体系环境不断变化,如 pH 下降、温度波动等,蛋白酶作为蛋白质,在不适宜的 pH 和温度条件下,其空间结构会逐渐被破坏,导致活性降低甚至失活。在不同发酵体系中,随着发酵时间延长及环境改变,蛋白酶活性呈下降趋势。

微生物生长阶段影响：发酵初期，乳酸菌为快速获取氮源用于生长繁殖，大量分泌蛋白酶分解蛋白质。但到后期，营养物质减少、代谢产物积累，乳酸菌生长受限，产酶能力下降，新合成的蛋白酶减少，进一步加剧蛋白酶含量降低。

如图 3-5 (D) 可知，纤维素酶先上升后下降。初期上升可能是因为乳酸菌在发酵过程中，为获取更多可利用的糖类营养物质，当感受到竹笋壳中纤维素等多糖类物质存在时，会诱导相关基因表达，合成并分泌纤维素酶。随着乳酸菌的生长繁殖，其数量增多，分泌的纤维素酶也逐渐增加。后期下降：随着发酵时间延长，一方面可能，纤维素酶催化纤维素分解，使得可作用的底物纤维素含量不断减少，酶与底物结合机会降低，根据酶促反应动力学，酶活性会随之下降。另一方面，发酵后期环境恶化，如有机酸大量积累使 pH 降低、温度变化等，这些不利因素影响纤维素酶的空间结构，导致其活性下降，含量也相对降低。

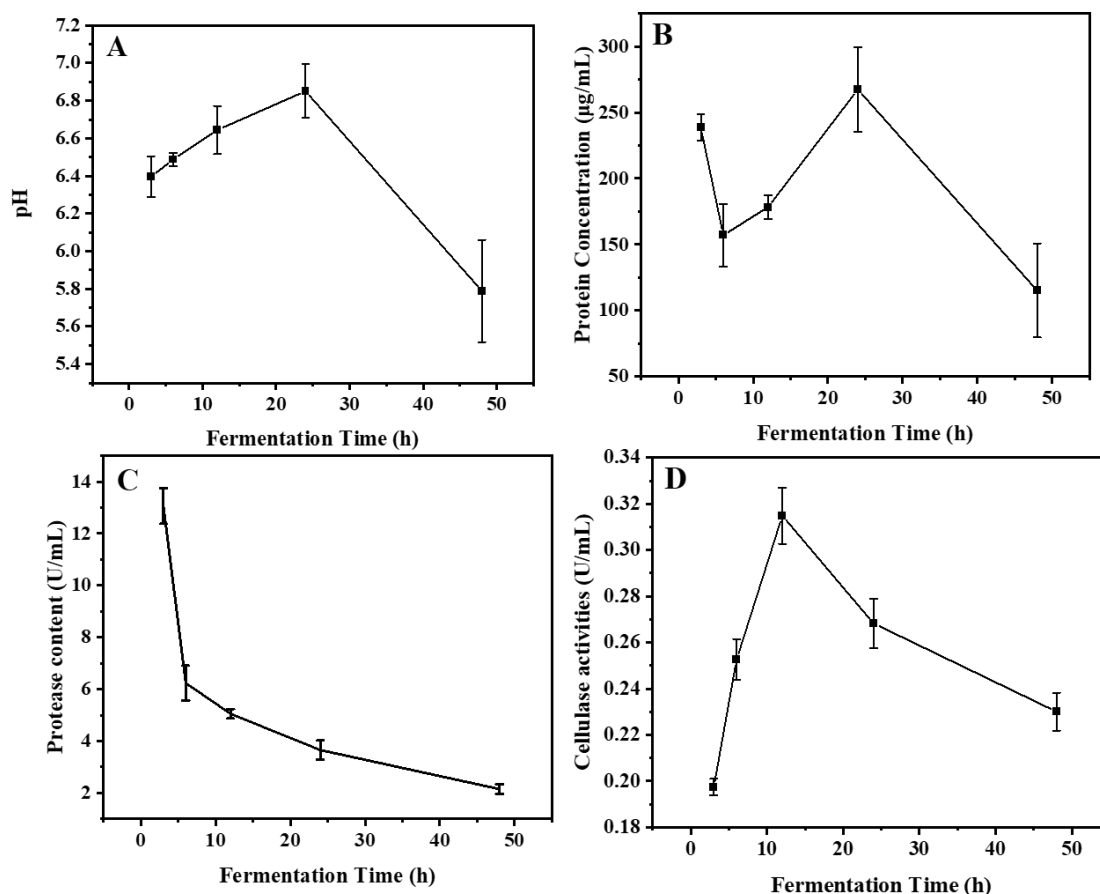


图 3-5 ME 过程中发酵培养基 pH 值 (A)、蛋白质含量 (B)、蛋白酶活性 (C) 和纤维素酶活性 (D) 的变化

Fig. 3-5 Variations of fermented media in pH value (A), protein content (B), protease ctivity (C), and cellulase activity (D) during ME

如图 3-6 (A) 可发现乳酸菌在发酵过程中, 酮类和酚类物质都是先下降后上升又逐渐平稳的原因可能是乳酸菌在发酵初期迅速生长繁殖, 代谢过程中消耗了体系内的氧气, 营造出相对厌氧的环境。酚类物质具有一定的抗氧化性, 在有氧环境下相对稳定, 但厌氧条件改变了其氧化还原电位, 促使部分酚类物质发生氧化反应^[136]。厌氧初期酚类物质因氧化而含量下降。同时, 乳酸菌代谢产生的有机酸可使体系 pH 值降低, 酸性环境会影响酚类物质的存在形式, 部分酚类物质可能会与酸发生反应, 形成酯类或其他衍生物, 从而降低了酚类物质的含量。对于酮类物质, 乳酸菌发酵初期会利用竹笋壳中的糖类、蛋白质等营养物质进行代谢活动。一些酮类物质可能作为中间代谢产物参与到复杂的生化反应途径中, 被进一步转化为其他物质。例如, 在微生物发酵某些碳水化合物的过程中, 中间产生的酮类会被继续代谢为醇类或酸类。而且, 初期发酵产生的大量代谢产物, 如挥发性脂肪酸等, 可能会与酮类物质发生相互作用, 改变其挥发性或化学性质, 导致检测到的酮类物质含量降低。

随着发酵进行, 乳酸菌持续代谢, 产生的酶类发挥了重要作用。以纤维素酶、半纤维素酶为例, 它们分解竹笋壳细胞壁结构, 使得原本包裹在细胞内部的酚类和酮类物质得以释放到发酵体系中。在发酵竹笋膳食纤维的过程中, 细胞壁结构的破坏会增加细胞内物质的溶出。乳酸菌发酵后总酚含量的增加可能是由于乳酸菌产生的酶可以破坏酚类与其他取代基之间的键合作用, 从而从植物细胞壁中释放可溶性共轭或不溶性结合酚类化合物^[137]。有学者证明, 乳酸菌可以将金银花中不易被人体消化吸收的结合酚类物质转化为可被人体消化利用的游离酚类物质^[138]。同时, 发酵中期体系的 pH 值稳定在一个相对较低的范围, 这种酸性环境虽然在初期促使部分酚类物质反应, 但也可能激活了一些潜在的酶活性。对于酮类物质, 乳酸菌在代谢过程中会产生一些次生代谢产物, 这些产物可能会参与到新的化学反应中, 合成新的酮类物质。乳酸菌代谢产生的某些有机酸和醇类, 在特定酶的作用下发生酯化、氧化等反应, 可能生成新的酮类化合物, 使得酮类物质含量有所上升。

当发酵进入后期, 体系内可被乳酸菌利用的营养物质逐渐减少, 乳酸菌的生长繁殖速度减缓, 代谢活动也逐渐平稳。此时, 产生的酶类等代谢产物的量相对稳定, 对竹笋壳细胞壁的分解作用以及对酚类和酮类物质的转化作用达到了一种

动态平衡。一方面，新释放或合成的酚类和酮类物质与被继续代谢或转化的量基本相当；另一方面，由于体系环境如 pH 值、氧化还原电位等不再发生明显变化，酚类和酮类物质的化学稳定性增强，其含量也就趋于平稳。在多种微生物发酵体系研究中发现，当营养物质耗尽、微生物生长进入衰亡期后，体系内各类代谢产物的含量会趋于稳定。

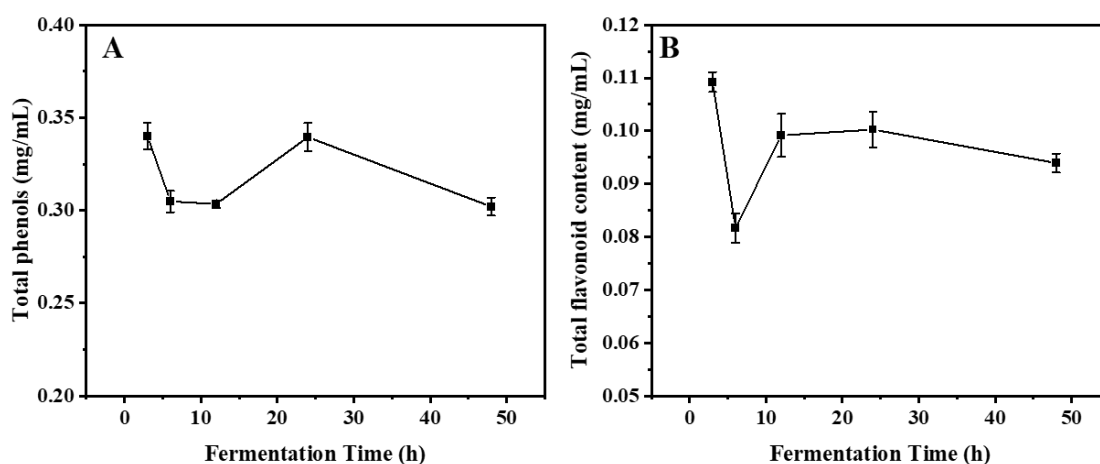


图 3-6 ME 过程中发酵培养基总酚含量 (A) 和总类黄酮含量 (B) 的变化

Fig. 3-6 Variations of fermented media in total phenolic content (a) and total flavonoid content (b) during ME.

3.8 多方法耦合机制解析

如图 3-7 所示设计了多种方法联合制备 SDF 的机制。SE 是一种常见的物理预处理方法，其中 BSS 原料用高温加压蒸汽处理，BSS 内部的水变成蒸汽并迅速膨胀，打破 BSS 外部的木质素分子，使更多的蒸汽渗透到 BSS 内部，BSS 的内部结构会在压力突然释放时分解^[139]。在 SE 中，纤维素和半纤维素是不溶性大分子多糖，通过热降解或氢键裂解转化为更小尺寸的 SDF^[129]。当细胞壁破裂时，会释放出酚类物质和类黄酮等各种物质。同时，碱性溶液在 AE 过程中容易进入 BSS 的破损内部结构。更多的羟基离子进一步破坏了纤维素和半纤维素之间的氢键和酯键，减小了 SDF 的大小并释放了更多的夹杂物^[93]。SE 和 AE 的联合使用改变了 SDF 的大小、构象、结晶度和官能团分布，影响了包括 OHC、WHC 和 GAC 在内的理化性能，内含物的释放提高了 SDF 的抗氧化能力。BSS 先后用 SE 和 AE 处理，获得体积更小、结构相对松散的 SA-IDF，有利于乳酸菌的附着

和生长。在添加氮源的基础上，首先产生更多的纤维素酶和葡萄糖苷酶，将 SA-IDF 降解为更小的 SDF^[57]。随着乳酸菌的发酵，有机酸的积累增强了 SA-IDF 的酸水解，从而提高了 SDF 产量。揭示了该机制阐明了 SE、AE 和 ME 对提高 SDF 产量、结构和性能具有协同作用。

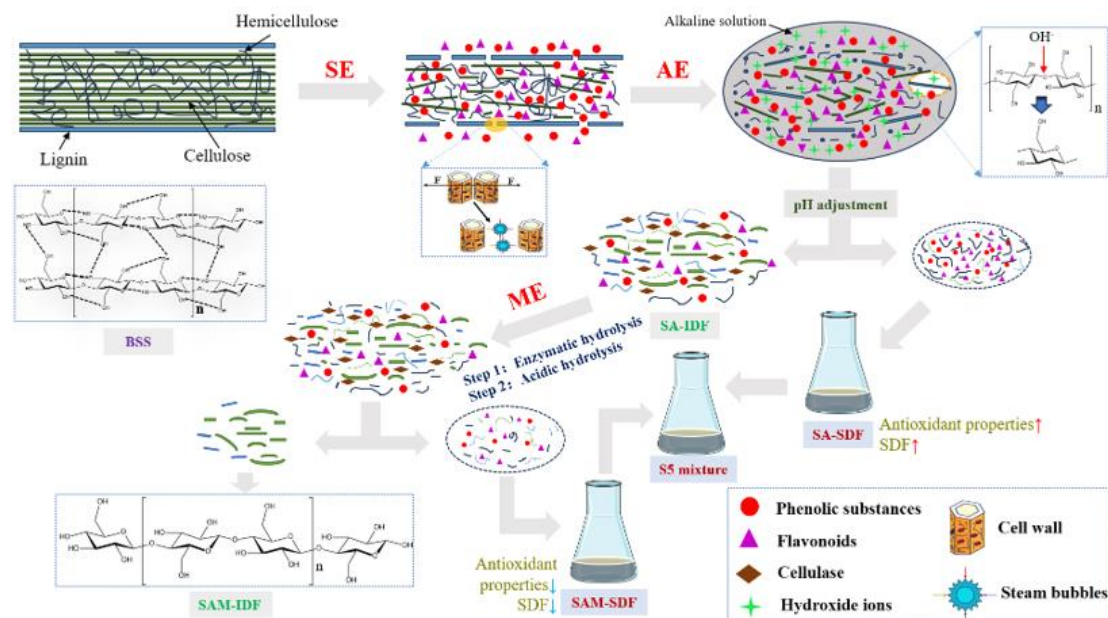


图 3-7 SE、AE 和 ME 联合制备 SDF 的机制

Fig. 3-7 Mechanism of the combination of SE, AE, and ME in the preparation of SDF

3.9 本章小结

本章研究了通过对不同方法制备的 SDF 进行产率、结构、性能、微生物发酵过程中参数的变化及其多种方法联合制备 SDF 的机制的探索。具体结果如下：

(1) 在本研究中，我们发现 SE、AE 和 ME 的联合使用最能提高 BSS-SDF 的产量和性能。达到了 28.28% 的最高产率，改进后的性能如下：1.4 g/g OHC、0.61 g/g WHC、1.56 mmol/g GAC、87% ABTSSC 和 74% DPPHSC。

(2) 揭示了三种方法之间的协同机制。SE 破坏了外层木质素，并促进 AE 进一步水解木质素和半纤维素，形成稀疏多孔的结构，有利于微生物进一步利用 IDF 制造更小尺寸的 SDF，具有不同结构和性能。了解多种提取方法之间的协同相互作用对于其他 SDF 生产具有重要意义，多种方法的组合使用将在更广泛的领域进一步推广。

(3) 不同方法制备的 SDFs 具有不同的粘度，对水凝胶等聚合物的结构和行

为影响很大。SDF 将用于调节和合成用于智能食品包装所需的聚合物，这一点上具有潜在的重要性。

第4章 结论与展望

4.1 结论

(1) 联合方法显著提升竹笋壳 SDF 产量和性能：通过对蒸汽爆破法、碱法和微生物发酵法等多种方法联用的研究，发现联合使用 SE、AE 和 ME 能有效提高竹笋壳 SDF 的产量，最高产率达到 28.28%。同时，该联合方法还显著改善了 SDF 的性能，包括 1.4 g/g 的 OHC、0.61 g/g 的 WHC、1.56 mmol/g 的 GAC，以及 ABTS 自由基清除率达 87%、DPPH 自由基清除率达 74%，使其在食品、医药和材料等领域具有更大的应用潜力。

(2) 明确不同方法对 SDF 结构和性能的影响：不同处理条件对 SDF 的结构和性能影响各异。蒸汽爆破法和碱提法的参数变化会改变 SDF 的分子结构、结晶度和官能团分布，进而影响其持水、持油和溶解等性能。微生物发酵过程中，乳酸菌产生的酶和有机酸可进一步降解不溶性膳食纤维，提高 SDF 产量。此外，不同方法制备的 SDF 在微观结构、流变学特性、热稳定性等方面也存在显著差异，这些差异为根据不同应用需求选择合适的制备方法提供了依据。

(3) 揭示多种方法联合制备 SDF 的协同机制：蒸汽爆破 (SE) 破坏竹笋壳外层木质素，促进碱性萃取 (AE) 进一步水解木质素和半纤维素，形成稀疏多孔结构，有利于微生物发酵 (ME) 利用不溶性膳食纤维 (IDF) 制造更小尺寸的 SDF。三种方法相互协同，改变了 SDF 的大小、构象、结晶度和官能团分布，不仅提高了 SDF 产量，还增强了其抗氧化等性能。这一机制的揭示为其他来源 SDF 的生产提供了重要的理论参考，有助于推动膳食纤维制备技术的发展。

4.2 展望

(1) 拓展应用领域研究：进一步探究竹笋壳 SDF 在食品、医药和材料等领域的具体应用。在食品领域，研究其作为功能性食品成分对食品品质、口感和营养特性的影响，开发新型健康食品，并且不同方法制备的 SDF 在调节和合成智能食品包装聚合物方面具有潜在应用价值；在医药领域，深入研究其对肠道微生物、血糖血脂调节等生理功能的影响机制，探索其在药物载体、缓释制剂等方面

的应用潜力；在材料领域，研究其与其他材料复合制备高性能材料的可行性，如生物可降解包装材料、组织工程支架等，以满足不同行业的需求。

（2）优化制备工艺：尽管联合方法已取得较好效果，但仍有优化空间。一方面，可以进一步研究各方法之间的协同作用，优化工艺参数，提高 SDF 的产量和质量，降低生产成本；另一方面，探索新的联合处理方式或结合其他新兴技术，如超临界流体萃取、微波辅助处理等，进一步提升竹笋壳 SDF 的制备效率和产品性能。

（3）深入研究结构与功能关系：目前虽对 SDF 的结构和性能有一定了解，但仍需深入研究其结构与功能之间的内在联系。通过更先进的分析技术，如高分辨率核磁共振、原子力显微镜等，深入探究 SDF 的微观结构特征，明确不同结构参数对其功能特性的影响机制，为精准调控 SDF 的性能提供理论基础，从而更好地指导其在不同领域的应用。

（4）加强工业化应用研究：在实验室研究取得成果的基础上，加强竹笋壳 SDF 工业化生产的研究。解决工业化生产过程中的关键技术问题，如大规模发酵设备的优化、工艺放大过程中的稳定性和重复性等问题，制定相应的质量标准和生产规范，推动竹笋壳 SDF 从实验室研究走向工业化应用，实现竹笋壳资源的高效利用和产业化发展。

参考文献

- [1] Ye L, Zhang J, Zhao J, etc. Liquefaction of bamboo shoot shell for the production of polyols[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 153: 147-153.
- [2] Łojewska J, Miśkowiec P, Łojewski T, etc. Cellulose oxidative and hydrolytic degradation: In situ FTIR approach[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 88(3): 512-520.
- [3] Liu H, He P, He L, etc. Structure characterization and hypoglycemic activity of an arabinogalactan from phyllostachys heterocycla bamboo shoot shell[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 201: 189-200.
- [4] Yang Y, Fan F, Xie J, etc. Isolation and characterization of cellulosic fibers from bamboo shoot shell[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(2): 1817-1829.
- [5] Zhao X, Wang Q, Wang T, etc. Evaluation of prebiotic ability of xylo-oligosaccharide fractions with different polymerization degrees from bamboo shoot shells[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2024, 143: 202-211.
- [6] Zafar M N, Aslam I, Nadeem R, etc. Characterization of chemically modified biosorbents from rice bran for biosorption of Ni(II)[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, 46: 82-88.
- [7] Li H, He Z, Jiang Y, etc. Bioconversion of bamboo shoot shells through the cultivation of the edible mushrooms *volvariella volvacea*[J]. *Ecotoxicology*, 2021, 30(7): 1476-1486.
- [8] Singhal P, Bal L M, Satya S, etc. Bamboo shoots: a novel source of nutrition and medicine[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(5): 517-534.
- [9] Chongtham N, Bisht M S, Santosh O, etc. Mineral elements in bamboo shoots and potential role in food fortification[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 95: 103662.
- [10] Xu Y, Liu Y H, Xu L H, etc. Multifunctional composite film of curcumin pickering emulsion stabilized by lignocellulose nanofibrils isolated from bamboo shoot shells for

- p>monitoring shrimp freshness[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 346: 122663.
- [11] Peng X, Liu J, Tang N, etc. Sequential extraction, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from dendrocalamus brandisii bamboo shoot shell[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100621.
- [12] Peng X, Hu X, Zhang Y, etc. Extraction, characterization, antioxidant and anti-tumor activities of polysaccharides from camellia fascicularis leaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 373-384.
- [13] Wu J, Zheng J, Xia X, etc. Purification and structural identification of polysaccharides from bamboo shoots (dendrocalamus latiflorus)[J]. International journal of molecular sciences, 2015, 16(7): 15560-15577.
- [14] Yang Y, Gao M, Wu Y, etc. Fabrication and characterization of electrospun polyacrylonitrile (PAN) @ bamboo shoot cellulose nanowhisker (BSCNs) @ carbon nanotube (CNT) composite membrane with enhanced dye adsorption properties[J]. Cellulose, 2022, 29(7): 3817-3827.
- [15] Ren H, Gao Q, Ni L, etc. Effect of deashing treatment on ash fusion characteristics of biochar from bamboo shoot shells[J]. Molecules, 2024, 29(6): 1400.
- [16] Satya S, Bal L M, Singhal P, etc. Bamboo shoot processing: food quality and safety aspect (a review)[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(4): 181-189.
- [17] Qing Q, Gao X, Wang P, etc. Dilute acid catalyzed fractionation and sugar production from bamboo shoot shell in γ -valerolactone/water medium[J]. RSC Advances, 2018, 8(31): 17527-17534.
- [18] Yao X, Wan R, Li C, etc. The hypoglycemic effect of enzymatic modified dietary fiber from bamboo shoot on type 2 diabetes rats[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(9): 5900-5911.
- [19] Zhao J, Wang S, Dong Z, etc. Effect of substituting *Pennisetum sinense* with bamboo shoot shell (BSS) on aerobic stability and digestibility of ensiled total mixed ration[J]. Italian Journal of Animal Science, 2021, 20(1): 1706-1715.
- [20] Chen L, Jiang X, Sun Y, etc. Composite optimization and characterization of dietary fiber-based edible packaging film reinforced by nanocellulose from grapefruit

- p Peel pomace[J].
- International Journal of Biological Macromolecules*
- , 2023, 253: 127655.
- [21] Liu W, Yan Y, Dong Y, etc. Biodegradable rice bran insoluble dietary fiber-chitosan blend films: characterization and potential applications[J]. *Food Bioscience*, 2025, 63: 105599.
- [22] Dhingra D, Michael M, Rajput H, etc. Dietary fibre in foods: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(3): 255-266.
- [23] Mann J I, Cummings J H. Possible implications for health of the different definitions of dietary fibre[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2009, 19(3): 226-229.
- [24] Li Y, Tian Y, Deng L, etc. High energy media mill modified pea dietary fiber: physicochemical property and its mechanism in stabilizing pea protein beverage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109392.
- [25] Qin W, Sun L, Miao M, etc. Plant-sourced intrinsic dietary fiber: physical structure and health function[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 341-355.
- [26] Dai G, Wang K, Wang G, etc. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 208: 273-280.
- [27] Bhaladhare S, Das D. Cellulose: a fascinating biopolymer for hydrogel synthesis[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2022, 10(12): 1923-1945.
- [28] Chen Y, Wang Y, Wan J, etc. Crystal and pore structure of wheat straw cellulose fiber during recycling[J]. *Cellulose*, 2010, 17(2): 329-338.
- [29] Wang J, Zhang J, Wang S, etc. Isolation and extraction of monomers from insoluble dietary fiber[J]. *Foods*, 2023, 12(13): 2473.
- [30] Qaseem M F, Shaheen H, Wu A M. Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110996.
- [31] Agarwal A, Rana M, Park J H. Advancement in technologies for the depolymerization of lignin[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 181: 115-132.

- [32]Asina F, Brzonova I, Kozliak E, etc. Microbial treatment of industrial lignin: successes, problems and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 1179-1205.
- [33]Park E J, Jhon D Y. Effects of bamboo shoot consumption on lipid profiles and bowel function in healthy young women[J]. Nutrition, 2009, 25(7-8): 723-728.
- [34]Slavin J L. Carbohydrates, dietary fiber, and resistant starch in white vegetables: links to health outcomes[J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(3): 351S-355S.
- [35]Sun Z, Zhao Y, Zhang Z, etc. Optimization of chemical extraction conditions of dietary fiber from *cistanche deserticola* residues and its structural characteristics and physicochemical and functional properties[J]. Molecules, 2023, 28(22): 7604.
- [36]Kanwar P, Yadav R B, Yadav B S. Influence of chemical modification approaches on physicochemical and structural properties of dietary fiber from oat[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111: 103688.
- [37]Dong R, Liao W, Xie J, etc. Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: microstructure, rheology and storage stability[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102901.
- [38]Xie F, Li M, Lan X, etc. Modification of dietary fibers from purple-fleshed potatoes (*heimeiren*) with high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing: a comparative study[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 157-164.
- [39]Tanpichai S, Witayakran S, Boonmahitthisud A. Study on structural and thermal properties of cellulose microfibers isolated from pineapple leaves using steam explosion[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(1): 102836.
- [40]Li B, Yang W, Nie Y, etc. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 48-56.
- [41]Xing Y, Zhou Y, Kuang C, etc. Structural, physicochemical and functional properties of dietary fibers from tea residue modified by steam explosion[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 7: 1326102.

- [42]Liu Y, Zhang H, Yi C, etc. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128352.
- [43]Ma Q, Ma Z, Wang W, etc. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient - dietary fiber extracted from potato residue[J]. LWT, 2022, 153: 112511.
- [44]Sun C, Wu X, Chen X, etc. Production and characterization of okara dietary fiber produced by fermentation with *Monascus anka* [J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126243.
- [45]Si J, Yang C, Ma W, etc. Screen of high efficiency cellulose degrading strains and effects on tea residues dietary fiber modification: structural properties and adsorption capacities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 337-347.
- [46]Zhou L, Luo J, Xie Q, etc. Dietary fiber from navel orange peel prepared by enzymatic and ultrasound-assisted deep eutectic solvents: physicochemical and prebiotic properties[J]. Foods, 2023, 12(10): 2007.
- [47]Wang L, Xu H, Yuan F, etc. Preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel assisted by steam explosion and dilute acid soaking[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 90-98.
- [48]Bader Ul Ain H, Saeed F, Khan M A, etc. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 2059-2067.
- [49]Brownlee I A. The physiological roles of dietary fibre[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 238-250.
- [50]Song J Y, Kim Y M, Lee B H, etc. Increasing the dietary fiber contents in isomaltooligosaccharides by dextransucrase reaction with sucrose as a glucosyl donor[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115607.
- [51]Nitzke D, Czermainski J, Rosa C, etc. Increasing dietary fiber intake for type 2 diabetes mellitus management: a systematic review[J]. World Journal of Diabetes, 2024, 15(5): 1001-1010.
- [52]He Y, Wang B, Wen L, etc. Effects of dietary fiber on human health[J]. Food

Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1-10.

[53]Cheng L, Zhang X, Hong Y, etc. Characterisation of physicochemical and functional properties of soluble dietary fibre from potato pulp obtained by enzyme-assisted extraction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 101: 1004-1011.

[54]Zheng Y, Wang Q, Huang J, etc. Hypoglycemic effect of dietary fibers from bamboo shoot shell: an in vitro and in vivo study[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 127: 120-126.

[55]Chen C, Zeng Y, Xu J, etc. Therapeutic effects of soluble dietary fiber consumption on type 2 diabetes mellitus[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2016, 12(2): 1232-1242.

[56]Ouyang K, Tao Q, Xie H, etc. Enrichment of bread with soluble and insoluble rice bran dietary fibers: a comparative study[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103927.

[57]Li Y, Niu L, Guo Q, etc. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran[J]. LWT, 2022, 154: 112609.

[58]Wang X, Zhang L, Qin L, etc. Physicochemical properties of the soluble dietary fiber from laminaria japonica and its role in the regulation of type 2 diabetes mice[J]. Nutrients, 2022, 14(2): 329.

[59]Van T T, Hang Phuong N T, Sakamoto K, etc. Effect of edible coating incorporating sodium carboxymethyl cellulose/cellulose nanofibers and self-produced mandarin oil on strawberries[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 40: 101197.

[60]Fang H, Yu W, Gao B, etc. Preparation of novel double cross-linked hydrogels of dietary fibers and proteins from soybeans as scaffolds for cultured meat[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(2): 1601-1613.

[61]Luo Y, Cui L, Zou L, etc. Mechanically strong and on-demand dissoluble chitosan hydrogels for wound dressing applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 294: 119774.

- [62]He S, Wang X, Zhang Y, etc. Isolation and prebiotic activity of water-soluble polysaccharides fractions from the bamboo shoots (*Phyllostachys praecox*)[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 295-304.
- [63]Zhang M, Liu Y, Liu J, etc. Extraction methods of dietary fiber and effect on bioactivity: a review[J]. Process Biochemistry, 2024, 146: 451-461.
- [64]Jiang G, Ameer K, Ramachandraiah K, etc. Impact of water combined wet ball milling extraction and functional evaluation of dietary fiber from papaya (*carica papaya* L)[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101435.
- [65]Zhao N, Wu J, Geng X, etc. Gelation mechanism of high soluble dietary fiber okara-egg tofu induced by combined treatment of steam explosion and enzymatic hydrolysis[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108602.
- [66]Ge Q, Mao J W, Cai C, etc. Effects of twin-screw extrusion on physicochemical properties and functional properties of bamboo shoots dietary fiber[J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2017, 11(4): 385-390.
- [67]Liu Y, Yi S, Ye T, etc. Effects of ultrasonic treatment and homogenization on physicochemical properties of okara dietary fibers for 3D printing cookies[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105693.
- [68]Yu X, Zhu K, Hu F, etc. Effects of ultrasonic treatment on the physicochemical, structural, and functional properties of soluble dietary fiber from coffee peels[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 114: 107247.
- [69]Wang S, Fang Y, Xu Y, etc. The effects of different extraction methods on physicochemical, functional and physiological properties of soluble and insoluble dietary fiber from *Rubus chingii*Hu. fruits[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 93: 105081.
- [70]Twebaze C, Zhang M, Zhuang X, etc. Banana fiber degumming by alkali treatment and ultrasonic methods[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(16): 12911-12923.
- [71]Tian X Y, Liu J F, Qiao C C, etc. Functional properties and structure of soluble dietary fiber obtained from rice bran with steam explosion treatment[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 118: 103938.

- [72]Li T, Liu R, Wang T, etc. Effects of steam explosion treatment on the physicochemical properties and biological activities of okara-derived soluble dietary fibre[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58(11): 5926-5937.
- [73]Zhang Y, Feng Y, Shi H, etc. Impact of steam explosion pretreatment of defatted soybean meal on the flavor of soy sauce[J]. LWT, 2022, 156: 113034.
- [74]Chutia H, Sharma M, Das M J, etc. Properties of dietary fibre from passion fruit seed obtained through individual and combined alkaline and ultrasonication extraction techniques[J]. Waste and Biomass Valorization, 2024, 15(4): 2345-2359.
- [75]Li D, Hou L, Hu M, etc. Recent advances in nattokinase-enriched fermented soybean foods: a review[J]. Foods, 2022, 11(13): 1867.
- [76]Tao L, Wang J, Zhu Q, etc. Effect of fermentation with *Lactobacillus fermentum* FL-0616 on probiotic-rich bean powders[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(3): 1144-1152.
- [77]Wuyts S, Van Beeck W, Allonsius C N, etc. Applications of plant-based fermented foods and their microbes[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2020, 61: 45-52.
- [78]Cheng A, Hou C, Sun J, etc. Effect of steam explosion on phenolic compounds and antioxidant capacity in adzuki beans[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12): 4495-4503.
- [79]Bader Ul Ain H, Saeed F, Ahmed A, etc. Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: a coherent review[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): e13917.
- [80]Xiong M, Feng M, Chen Y, etc. Comparison on structure, properties and functions of pomegranate peel soluble dietary fiber extracted by different methods[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100827.
- [81]Luo X, Wang Q, Fang D, etc. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: structural characterization and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1461-1467.
- [82]Tang X, Wang Z, Zheng J, etc. Physicochemical, structure properties and in vitro

hypoglycemic activity of soluble dietary fiber from adlay (*Coix lachryma-jobi* L. var. *ma-yuen* stapf) bran treated by steam explosion[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1124012.

[83]Yang R, Ye Y, Liu W, etc. Modification of pea dietary fibre by superfine grinding assisted enzymatic modification: structural, physicochemical, and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131408.

[84]Zhang Y, Wu L, Zhang F, etc. Sucrose ester alleviates the agglomeration behavior of bamboo shoot dietary fiber treated via high pressure homogenization: influence on physicochemical, rheological, and structural properties[J]. *Food Chemistry*, 2023, 413: 135609.

[85]Zheng Y, Zhang S, Wang Q, etc. Characterization and hypoglycemic activity of a β -pyran polysaccharides from bamboo shoot (*Leleba oldhami* Nakal) shells[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 144: 438-446.

[86]Lin Z, Chen J, Zhang J, etc. Potential for value-added utilization of bamboo shoot processing waste—recommendations for a biorefinery approach[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(5): 901-912.

[87]Luo X, Wang Q, Zheng B, etc. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2017, 109: 1003-1009.

[88]Tian X Y, Liu J F, Cheng Z, etc. Structure, thermal stability, physicochemical and functional characteristics of insoluble dietary fiber obtained from rice bran with steam explosion treatment: effect of different steam pressure and particle size of rice bran[J]. *Food Research International*, 2024, 187: 114310.

[89]Wang C, Lin M, Li Y, etc. Effect of steam explosion modified soluble dietary fiber from tremella fuciformis stem on the quality and digestibility of biscuits[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265: 130905.

[90] Gan J, Xie L, Peng G, etc. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106872.

[91]Karra S, Sebi H, Yaich H, etc. Effect of extraction methods on the physicochemical,

structural, functional, and antioxidant properties of the dietary fiber concentrates from Male date palm flowers[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(6).

[92]Zhang Z, Smith C, Li W. Extraction and modification technology of arabinoxylans from cereal by-products: a critical review[J]. Food Research International, 2014, 65: 423-436.

[93]Tejada-Ortigoza V, Garcia-Amezquita L E, Serna-Saldívar S O, etc. Advances in the functional characterization and extraction processes of dietary fiber[J]. Food Engineering Reviews, 2016, 8(3): 251-271.

[94]Wang Y Q, Wang J D, Cai Z H, etc. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from rosa roxburghii pomace fermented by *Bacillus natto*[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102030.

[95]Wang C, Song R, Wei S, etc. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties[J]. LWT, 2020, 125: 109220.

[96]Ye S, Shah B R, Li J, etc. A critical review on interplay between dietary fibers and gut microbiota[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 237-249.

[97]Liao A M, Zhang J, Yang Z L, etc. Structural, physicochemical, and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber modified with probiotic fermentation[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 803440.

[98]Wang X, Xue H, Li Y, etc. Characterization of physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from separate and co-fermented okara by lactic acid bacteria and *Kluyveromyces marxianus* C21[J]. LWT, 2024, 205: 116476.

[99] Zhang Z, Liu B, Liu X, etc. Effects of steaming on sweet potato soluble dietary fiber: content, structure, and *Lactobacillus* proliferation In vitro[J]. Foods, 2023, 12(8): 1620.

[100] Chen C, Xin Y, Li X, etc. Effects of *Acremonium* cellulase and heat-resistant lactic acid bacteria on lignocellulose degradation, fermentation quality, and microbial community structure of hybrid elephant grass silage in humid and hot areas[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1066753.

- [101] Huang Y, Li C, Zheng S, etc. Influence of three modification methods on the structure, physicochemical, and functional properties of insoluble dietary fiber from *rosa roxburghii* trapp pomace[J]. *Molecules*, 2024, 29(9): 2111.
- [102] Zheng Y, Wang X, Sun Y, etc. Effects of ultrafine grinding and cellulase hydrolysis separately combined with hydroxypropylation, carboxymethylation and phosphate crosslinking on the in vitro hypoglycaemic and hypolipidaemic properties of millet bran dietary fibre[J]. *LWT*, 2022, 172: 114210.
- [103] Cao Y, Tian B, Zhang Z, etc. Positive effects of dietary fiber from sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] peels by different extraction methods on human fecal microbiota in vitro fermentation[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 986667.
- [104] Ma M mei, Mu T hua. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 237-246.
- [105] Cui W, Wang Y, Sun Z, etc. Effects of steam explosion on phenolic compounds and dietary fiber of grape pomace[J]. *LWT*, 2023, 173: 114350.
- [106] Ji R, Zhang X, Liu C, etc. Effects of extraction methods on the structure and functional properties of soluble dietary fiber from blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) berry[J]. *Food Chemistry*, 2024, 431: 137135.
- [107] Yu G, Bei J, Zhao J, etc. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa* hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure[J]. *Food Chemistry*, 2018, 257: 333-340.
- [108] Wang W, Quan Z, Kou F, etc. Preparation and characterization of soluble dietary fiber from tiger nut residues, showing enhanced antioxidant activity and metal-ion-binding properties[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1275473.
- [109] Ee K Y, Khoo L Y, Ng W J, etc. Effects of bromelain and trypsin hydrolysis on the phytochemical content, antioxidant activity, and antibacterial activity of roasted butterfly pea seeds[J]. *Processes*, 2019, 7(8): 534.
- [110] Wang C, Lin M, Li Y, etc. Improvement of soluble dietary fiber quality in tremella fuciformis stem by steam explosion technology: an evaluation of structure and

- function[J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137867.
- [111] Boateng I D, Kumar R, Daubert C R, etc. Sonoprocessing improves phenolics profile, antioxidant capacity, structure, and product qualities of purple corn pericarp extract[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106418.
- [112] Chen H, Xiong M, Bai T, etc. Comparative study on the structure, physicochemical, and functional properties of dietary fiber extracts from quinoa and wheat[J]. LWT, 2021, 149: 111816.
- [113] Huo Y, Niu Y, Feng S, etc. Effect of three modification methods on physical and functional properties of flaxseed cake dietary fiber[J]. LWT, 2024, 198: 116076.
- [114] Cardoso M A P, Carvalho G M, Yamashita F, etc. Oat hull fibers bleached by reactive extrusion with alkaline hydrogen peroxide in thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composites[J]. Polymer Composites, 2018, 39(6): 1950-1958.
- [115] Liu J, Zhang J, Zhang B, etc. Determination of intrinsic viscosity-molecular weight relationship for cellulose in BmimAc/DMSO solutions[J]. Cellulose, 2016, 23(4): 2341-2348.
- [116] Huang L, Ding X, Zhao Y, etc. Modification of insoluble dietary fiber from garlic straw with ultrasonic treatment[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13399.
- [117] Gan J, Huang Z, Yu Q, etc. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105549.
- [118] Guo Y, Liu W, Wu B, etc. Modification of garlic skin dietary fiber with twin-screw extrusion process and in vivo evaluation of Pb binding[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 550-557.
- [119] Li S, Hu N, Zhu J, etc. Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100298.
- [120] Zhang S, Xu X, Cao X, etc. The structural characteristics of dietary fibers from

tremella fuciformis and their hypolipidemic effects in mice[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 503-511.

[121] Geng N, Wang H, Zhang Y, etc. Physicochemical, structural, and functional properties of microfluidic modified dietary fiber from fresh corn bracts[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 112: 103731.

[122] Liu X, Liu Y, Du X, etc. Characterization of bamboo shoots dietary fiber modified by ball milling and its role in altering the physicochemical properties of shrimp surimi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271: 131979.

[123] Zhao X, Chen J, Chen F, etc. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. Colloids and Surfaces, B: Biointerfaces, 2013, 104: 207-212.

[124] Zugenmaier P. Conformation and packing of various crystalline cellulose fibers[J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(9): 1341-1417.

[125] Du X, Wang L, Huang X, etc. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour[J]. LWT, 2021, 143: 111031.

[126] Nawrocka A, Szymańska-Chargot M, Miś A, etc. Dietary fiber-induced changes in the structure and thermal properties of gluten proteins studied by fourier transform-raman spectroscopy and thermogravimetry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(10): 2094-2104.

[127] Fernández-López J, Sendra-Nadal E, Navarro C, etc. Storage stability of a high dietary fibre powder from orange by-products[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(4): 748-756.

[128] Jiang Y, Yin H, Zheng Y, etc. Structure, physicochemical and bioactive properties of dietary fibers from akebia trifoliata (Thunb.) Koidz. seeds using ultrasonication/shear emulsifying/microwave-assisted enzymatic extraction[J]. Food Research International, 2020, 136: 109348.

[129] Wang T, Xiao Z, Li T, etc. Improving the quality of soluble dietary fiber from poria cocos peel residue following steam explosion[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19:

100829.

[130] Qiao H, Shao H, Zheng X, etc. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127522.

[131] Zhu F M, Du B, Li J. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from wine grape pomace[J]. *Food Science and Technology International*, 2014, 20(1): 55-62.

[132] Elkhalfi A E O, Schiffler B, Bernhardt R. Effect of fermentation on the functional properties of sorghum flour[J]. *Food Chemistry*, 2005, 92(1): 1-5.

[133] Liszkowska W, Motyl I, Pielech-Przybylska K, etc. Mixed culture of yeast and lactic acid bacteria for low-temperature fermentation of wheat dough[J]. *Molecules*, 2024, 30(1): 112.

[134] Jayaram V B, Rezaei M N, Cuyvers S, etc. Ethanol at levels produced by *Saccharomyces cerevisiae* during wheat dough fermentation has a strong impact on dough properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(38): 9326-9335.

[135] Olukomaiya O O, Adiamo O Q, Fernando W C, etc. Effect of solid-state fermentation on proximate composition, anti-nutritional factor, microbiological and functional properties of lupin flour[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126238.

[136] Wu X, Li F, Wu W. Effect of rice bran rancidity on the structure and antioxidant properties of rice bran soluble dietary fiber[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 105: 103469.

[137] Tang F, Wei B, Qin C, etc. Enhancing the inhibitory activities of polyphenols in passion fruit peel on α -amylase and α -glucosidase via β -glucosidase-producing *Lactobacillus* fermentation[J]. *Food Bioscience*, 2024, 62: 105005.

[138] Ran J, Tang Y, Mao W, etc. Optimization of the fermentation process and antioxidant activity of mixed lactic acid bacteria for honeysuckle beverage[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1364448.

[139] Sarker T R, Pattnaik F, Nanda S, etc. Hydrothermal pretreatment technologies for

lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis[J].
Chemosphere, 2021, 284: 131372.

在校期间发表论文、专利、获奖情况

[1] **Wang Y**, Tong J, Wang T, etc. Combined use of steam explosion, alkali, and microbial methods improving the yield, structure and properties of soluble dietary fiber from bamboo shoot shells[J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142-754.

[2] Han Z, Wang M, Hu Z, **Wang, Y**, etc. Tracking the enzyme-response mechanism of tannic acid-embedded chitosan/ γ -polyglutamic acid hydrogel[J]. Communications Materials, 2024, 5(1): 137.

[3] Tong J, Yu C, **Wang Y, etc.** Simultaneous use of two-step fermentation and in-situ addition of chitosan oligosaccharide improving bacterial cellulose pellicle in the synthesis and various behaviors[J]. Cellulose, 2024, 31(8): 4967-4987.

致谢

行文至此，意味着我的硕士生涯已至谢幕时刻，回首三年的安工程的研究生生活，百感交集，酸甜苦辣集结于心头，但心中充盈最多的是感激。

首先，特别感谢我敬佩的导师聂光军老师。感谢聂老师三年来在学习科研以及毕业论文选题、研究、撰写过程中给予我的悉心指导。聂老师为人严谨、言传身教，总是能为学生着想，每次与聂老师讨论学习生活上的困惑总能让我受益匪浅。聂老师求真务实的科研精神、实事求是的人生准则为我树立了一个很好的学习榜样。他严谨的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励我的一生，他对我的关心和教诲我更将永远铭记。

同时，我也要感谢在论文开题、中期和答辩过程中给予我意见的薛正莲老师、钱森和老师、唐红进老师、李松老师、魏明老师、刘艳老师、刘庆涛老师，感谢各位老师的支持和帮助。在此，还需要感激父母，是他们寄予了我殷切的期望，无私地支持我的学业，让我得到了继续深造的机会,也使我度过了一段充实美好的时光。

感谢我的同门童杰，共同走过三年最快乐、最难忘的硕士生活。临别之际，祝愿你在以后的日子里能够工作顺利，生活美满幸福。感谢韩振兴师兄、胡紫薇师姐、马若彤师妹、王汀师弟和程思雨师妹的热情帮助和支持。203的小伙伴们，我们惺惺相惜，你们是我生活中的好搭档，学习中的好伙伴，研究上的好助手，是你们的一路陪伴，我的研究生生活才更加的丰富多彩。

最后，向参加论文评阅、答辩及提出宝贵意见的专家、老师致以衷心的感谢！