

王丽, 康晶晶. 发酵技术在膳食纤维改性中的应用 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 400–409. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020237

WANG Li, KANG Jingjing. Application of Fermentation Technology in Modification of Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 400–409. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020237

· 专题综述 ·

发酵技术在膳食纤维改性中的应用

王 丽, 康晶晶*

(贵州医科大学公共卫生学院, 环境污染与疾病监控教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘 要:膳食纤维 (Dietary fiber, DF) 被称作“第七营养素”, 拥有良好的生理功能及活性, 其中, 可溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF) 生理和生物活性优于不可溶性膳食纤维 (Insoluble dietary fiber, IDF)。然而, 植物 DF 中 SDF 的含量较低, 限制了 DF 功能性产品的开发与应用, 因此, 通过 DF 改性来增加 SDF 的比例和改善 DF 的理化应用性质势在必行。基于 DF 的定义以及其理化性质与功能性的关系, 本文首先阐述了 DF 改性的必要性, 通过比较 DF 各种改性方法, 明确了研究发酵技术改性 DF 的意义; 然后分别从发酵技术改性 DF 机理、优势、影响因素和发酵改性 DF 的应用现状等方面出发, 对发酵技术在 DF 改性中的应用进行了重点介绍; 最后对发酵技术改性 DF 的发展趋势进行了展望。为未来 DF 改性研究及应用研究提供理论参考。

关键词:膳食纤维, 发酵技术, 改性, 理化性质, 功能性性质, 应用

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)06-0400-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020237



本文网刊:

Application of Fermentation Technology in Modification of Dietary Fiber

WANG Li, KANG Jingjing*

(The Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Acting as “the seventh nutrient”, dietary fiber owns excellent biological function and activity, among which SDF shows better performance than IDF. However, the content of SDF in most plant DF is low, which limits the development and application of functional DF products. Therefore, it is imperative to modify DF to increase the SDF content for improving of the physicochemical application properties of DF. Based on the relationship between DF types and its functionality, the necessity of DF modification is clarified first in this paper. By comparing different methods of modifying DF, the feasibility of modifying DF by fermentation technology is confirmed. And then application of fermentation technology in DF modification is introduced in particular from several aspects, i.e. the advantages, modification mechanism, influencing factors of modification of DF by fermentation technology, as well as the applied range of modified DF. Lastly, the development trend of DF modification by fermentation technology is prospected, providing some theoretical references for the future modification and application research of DF.

Key words: dietary fiber; fermentation technology; modification; physical and chemical properties; functional properties; application

膳食纤维 (Dietary Fiber, DF), 又称为人体第 7 营养素^[1], 广泛存在于植物 (杂粮、豆制品、蔬果及菌藻类) 的表皮中, 对人体具有重要生物活性^[2-3], 例如 DF 不仅能够预防心血管疾病和肠道疾病的发生,

还能减缓重金属对人体的毒性, 与人类的身体健康和生理功能密切相关^[4], 因此, 除英国与日本外, 世界各国对 DF 推荐摄入量均有了明确的规定 (25~35 g/d)^[5-6]。然而, 天然的 DF 中 IDF 含量过高, 整体口感粗糙,

收稿日期: 2021-03-01

基金项目: 贵州省区域内一流学科建设项目-公共卫生与预防医学 (黔教科研发 2017[85] 号)。

作者简介: 王丽 (1997-), 女, 本科, 研究方向: 食品卫生与营养, E-mail: 1436846637@qq.com。

* 通信作者: 康晶晶 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 植物功能性成分研究, E-mail: kangjingjing1027@126.com。

人体几乎无法吸收和消化,因此天然 DF 的生物活性发挥受限,多作为废料被丢弃,造成了一定的环境压力和 DF 资源浪费。为了改变人们日常饮食中 DF 摄入不足的现象,不少企业纷纷将谷豆类、果蔬类、海藻类和其他植物中的 DF 应用于各种食品中,DF 市场日渐繁荣。为了更有效地综合利用 DF 资源,有必要借助相关的改性方法来增加水溶性 DF (Soluble Dietary Fiber, SDF)的比例。研究发现,当 DF 中 SDF 含量达到 25% 以上,才能够发挥 DF 的最佳生理功能^[7]。目前,通过物理、化学或生物等改性方法,提高 DF 中 SDF 含量,改善 DF 理化性质和生物活性,已成为了 DF 的研究热点。改性后 DF 中 SDF 含量增加,其持水力、膨胀性、粘性和吸附作用均有所改善,展现出更好的加工特性和应用活性。

发酵技术是利用微生物的发酵作用,运用技术手段工业化生产某一特定发酵产物的技术;发酵技术改性 DF 就是运用技术手段促使微生物大量分泌纤维素水解酶,用于改变 DF 的结构和生物活性的过程^[8]。研究发酵技术在 DF 改性中的应用,不仅增加了 DF 的品质和应用价值,还迎合了当下利用发酵技术加工保鲜食品的趋势,利于研究食品发酵过程中 DF 与其它营养成分的相互作用,从分子水平揭秘 DF 的活性机理。本文分别从 DF 定义、DF 理化性质和功能性质、微生物改性 DF 的优势和微生物改性 DF 的应用等方面对发酵技术在膳食纤维改性中的应用进行了综述,为未来发酵改性 DF 的研究提供理论参考。

1 膳食纤维的简介

1.1 膳食纤维的定义

据表 1 可知,自 Hispley 于 1953 年首次提出 DF 概念以来,各界展开了长达半个世纪之久的 DF 定义探讨,尽管说法各异,但总体上 DF 的定义基本满足以下条件^[9]:食物原料来源;单体数目 ≥ 3 且不提供能量的糖类碳水化合物;人体消化道内不能消化吸收;有益于人体健康。根据以上要求,DF 主要由纤维素、半纤维素、木质素、植物黏质、果胶、葡聚糖及部分低聚糖组成^[10]。根据其水中溶解性差异,DF 主

要分为可溶性 DF (Soluble Dietary Fiber, SDF)和不可溶性 DF (Insoluble Dietary Fiber, IDF)^[11],其中,SDF 主要为植物细胞内存物、植物细胞分泌物和部分微生物多糖及部分合成多糖,而 IDF 主要为纤维素、木质素、植物蜡和部分半纤维素,多来自于细胞壁^[12]。

1.2 膳食纤维的理化性质与功能性质

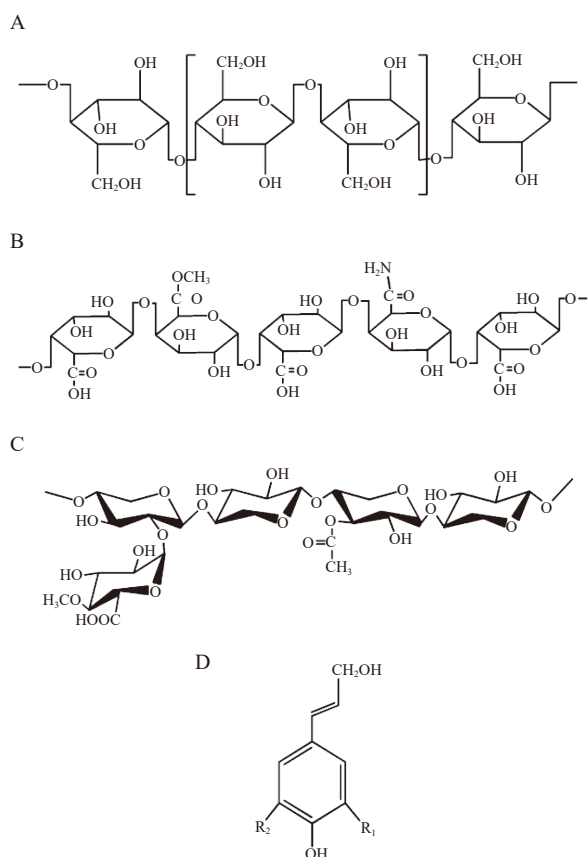
DF 是一类人体无法消化的多糖类碳水化合物,因 DF 种类不同,其化学结构、化学组成和物理特性均有所区别^[19],例如,IDF 的主要功能是持水膨胀,在肠道内产生机械蠕动,防止便秘发生,在保持肠道健康方面发挥着积极作用^[20];SDF 能调节胆固醇血脂含量,在预防糖尿病、心血管疾病和结肠癌方面具有较好的生物活性^[21]。由图 1 所示,DF 化学结构中含有大量的氨基、羧基、羟基、醛基和酮基等活性基团,这些活性基团的存在赋予了 DF 较强的持水性、持油性、吸附作用和可逆交换^[22-23](如图 2)等功能活性;由于羟基、氨基和羧基等亲水性基团的大量存在,DF 具有较强的持水性,当 DF 吸收了大量的水后,体积就会发生膨胀,粘度增加,排空时间和胃消化吸收时间延长,促使人体产生较强的饱腹感,起到减餐作用,同时 DF 的疏松多孔结构增加了其吸附脂类、胆固醇和糖类的能力,阻碍了这些成分在人体中的吸收,进而预防高血脂、高胆固醇症、胆结石和肥胖病的发生,促使 DF 发挥出降脂减肥的功效;另外,持水的 SDF 形成溶胶,能够润滑肠道,加快排便速度,防治肠道疾病的发生^[24]。

1.3 改性在膳食纤维生产应用中的积极作用

天然植物的 DF 中 SDF 含量很低,不利于 DF 生物活性和保健功能的发挥,当其替代糖类或脂肪作为填充剂添加于食物中,DF 无法被胃肠消化,故多被大量丢弃,增加了可食植物综合利用的难度,造成了 DF 资源的极大浪费^[7]。故可采用不同的改性方法对天然 DF 进行改性,增加 DF 中 SDF 比例。例如,朱妞^[27]研究了苹果渣经绿色木霉发酵改性后的理化特性发现,改性后苹果渣 DF 的理化性质更佳,膨胀力、持水力、阳离子交换力、乳化性和乳化稳定

表 1 各界对膳食纤维的定义
Table 1 Definition of dietary fiber from all walks of life

个人或组织	时间	定义要点
Hipsley等 ^[13]	1953	不可消化的植物细胞壁组分
Hugh等 ^[14]	1972	人体内源消化酶不能分解的植物成分
美国谷物化学家协会 ^[15-16]	2000	人体不能水解和吸收,大肠部分或完全酵解,植物源可食
美国科学学会 ^[17]	2001	人体不消化的碳水化合物及植物木质素
	2002	首次提出膳食纤维摄入量
国际食品法典委员会 ^[18]	2004	人体小肠不消化吸收、可食性碳水化合物聚合物
中国营养学会 ^[2]	2005	不被消化酶消化,多糖类食物成分
FAO/WHO ^[2]	2007	非消化的碳水化合物,内源性细胞壁多糖
欧盟 ^[2]	2008	单体数目 ≥ 3,人体小肠不消化吸收
国际食品法典委员会 ^[2]	2009	单体数目 ≥ 10,人体小肠不酵解,有益健康,碳水化合物

图1 膳食纤维的分子结构^[25-26]Fig.1 Molecular structures of dietary fiber^[25-26]

注: A-纤维素(IDF); B-果胶(SDF); C-半纤维素(IDF); D-木质素(IDF)

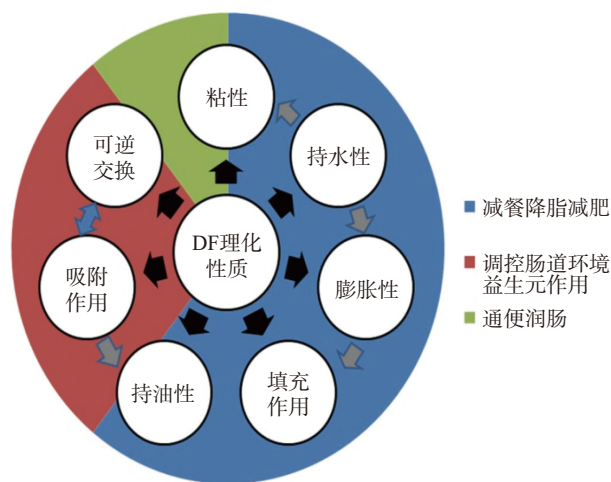


图2 膳食纤维理化性质与功能性质的关系

Fig.2 Relationship between physical-chemical properties and functional properties of dietary fiber

性分别增加了 117.77%、106.85%、53.46%、1.52% 和 15.24%，并对 NO_2^- 和胆酸钠具有较强的吸附效果；张海芳等^[28] 研究发现马铃薯 DF 经复合酶改性后持水力、持油力、结合水力、溶解度和阳离子交换力分别提高了 115.22%、16.73%、27.18%、45.27% 和 173.18%；因此对 DF 的改性，不仅从根本上减少了原料的浪费，利于 DF 资源的综合利用，还改善了 DF 的品质，

使其应用特性和生物活性最大化，在 DF 生产应用中发挥着重要的作用。

2 微生物发酵与膳食纤维改性

2.1 微生物发酵改性膳食纤维的作用机理

所选的微生物菌种利用原料中的碳水化合物、蛋白质和脂肪等成分，在合适的发酵条件（温度、 O_2 和 pH）下进行生长繁殖，并向发酵环境中分泌出纤维水解酶、葡萄糖苷酶或木聚糖酶，这些酶进一步将原料环境中的大分子 IDF（纤维素、半纤维素和木质素）水解为较小分子的 SDF^[29-30]；另外，由于发酵时间较长，培养环境中产生了大量的有机酸代谢产物，DF 长时间处于酸性的条件下，糖苷键易断裂，DF 大分子聚合度下降，部分 DF 转化成 SDF，从而达到 DF 改性效果^[8]；不仅如此，相关研究发现，酸性环境下改性的 DF 具有更好的生物活性^[31]。目前，微生物发酵改性的 DF 原料主要为果蔬皮渣^[32-33]、梁谷麸皮^[34-37] 及其它农副产品^[38-41]，所涉及的微生物菌群主要包括有乳酸菌类^[42]、霉菌^[43-44]、酵母菌^[45] 和食用菌^[46] 等。例如，Li 等^[47] 采用植物乳酸菌和乳酸链球菌混合菌种对四川腌菜中的 DF 进行改性发现，改性后 DF 的溶胀性、保水性、重金属吸附力、胆酸盐吸附力和 α -淀粉酶抑制力均有所提高；Chen 等^[48] 研究了绿色木霉发酵对茶渣 SDF 结构特征及体外结合能力的影响发现，发酵 21 d 后，茶渣 SDF 含量增加至 31.56%，改性后的茶渣 DF 热稳定、结晶度、结合重金属能力均增加。

2.2 微生物发酵改性膳食纤维的优势

如表 2 所示，除了微生物发酵改性外，DF 的改性方法还主要包括物理改性、化学改性和酶改性等 3 种，其中，DF 物理改性的能耗较大，一定程度上限制了改性 DF 的生产规模；化学改性过程中因使用了大量试剂，易造成环境污染，且 DF 产品存在一定的安全隐患；酶法改性对酶的特异性要求较高，酶制剂花销成本较高，从而限制了 DF 原料的选择；与酶法相比，微生物发酵法中 DF 改性酶种类更多，产出的 SDF 种类更丰富，并解决了酶解产物的分离问题，生产成本大大降低，更易于 DF 的工业化改性^[49]。因此，微生物发酵改性法尽管耗时较长，但工艺简单、成本低、且改性后 DF 产品的应用性能和生物活性较好。与其他 3 种改性方法相比，微生物发酵改性法优势更明显，例如，陶俊奎^[50] 比较了化学、酶法和发酵改性竹笋 DF 的感官品质、理化特性及微观形态发现，发酵法 DF 的整体品质优于其它两种；赵雪^[51] 研究发现发酵法改性的麦麸 DF 在肠道菌群调节方面效果优于酶改性和化学改性；李可^[52] 测定和比较了不同方法改性的亚麻籽粕 DF 的理化性质发现，乳酸菌发酵的亚麻籽粕 DF 品质最优；同样，徐灵芝等^[53] 研究发现微生物发酵改性的雷竹笋渣 DF 在水合、阳离子交换、胆固醇吸附和 NO_2^- 吸附方面均优于化学改性 DF。为了显著改善改性 DF 的品质，不少学者

表 2 膳食纤维常用的改性方法

Table 2 Methods commonly used in the modification of dietary fiber

改性名称	作用机理	采用方法	优势	劣势
物理改性	通过机械设备破碎膨化DF, 改变DF结构 ^[55]	高温蒸煮 ^[56-57] 、挤压 ^[7] 膨化 ^[58] 、超高压 ^[59] 和超微粉碎 ^[60]	安全 ^[56]	效率低, 生产成本低, 无法大规模生产 ^[55]
化学改性	利用酸或碱断裂DF糖苷键, 进而降低纤维大分子的聚合度, 提高DF中SDF比例 ^[61]		处理简单、成本低 ^[63]	时间长, 转化效率低、产品纯度低、有安全隐患、应用性能低 ^[62]
酶改性	生物酶将DF大分子结构酶解成小分子化合物 ^[60]	纤维素酶 ^[28,62] 、木聚糖酶 ^[63]	条件温和、特异性强、时间短、副产物少 ^[64]	酶制剂成本高、转化效率低 ^[64]
微生物发酵	微生物产生的多种酶将DF大分子结构水解 ^[60]	乳酸菌 ^[42] 、霉菌 ^[43-44] 、酵母菌 ^[45] 和食用菌 ^[46]	生物活性和应用性能增加 ^[64]	微生物菌种选育困难 ^[64]

将微生物发酵改性与其它改性方法联合, 如林德荣^[54]将发酵后豆渣 DF 经过动态超高压处理表观粘度显著增加, 持水力和膨胀力提高。

2.3 微生物发酵改性膳食纤维的影响因素

微生物发酵过程中影响 DF 改性效果的因素主要有微生物菌群、菌种的接种量、发酵原料、发酵 pH、发酵温度和发酵时间等, 其中, 微生物菌群是 DF 改性成功与否的关键因素, 而菌种接种量、DF 原料、发酵 pH 和发酵时间以及发酵温度等则严重地影响 DF 的转化效率。

2.3.1 发酵菌种的选择 菌种不同, 其适宜的发酵环境不同, 其生长繁殖过程中分泌的酶种类和含量也不同, 这些环境和酶的差异一定程度上影响了 DF 的改性效果。例如, 李艳芳等^[65]比较了黑曲霉和米曲霉的改性效果, 发现黑曲霉改性豆渣 DF 效果优于米曲霉; 袁惠君等^[66]研究发现米根霉 2 种方式(固体发酵和液体发酵)改性马铃薯渣效果均优于白地霉; 赵泰霞等^[67]更是采用复合菌群(保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌)进行豆渣改性, 改性后的豆渣品质和风味均有所显著的改善。因此, 菌种的选择对 DF 改性的整体效果具有重要的意义。

2.3.2 发酵菌种的接种量 适宜的接种量对微生物改性 DF 的效果影响较大, 接种量过大或过小, 均不利于 SDF 的生成。当接种量过少时, 发酵环境达到 DF 改性条件所需的时间较长, 一定时间内的 DF 改性效果不显著; 随着菌种接种量的增加, 菌种大量繁殖, 纤维素酶的分泌量增加, SDF 产率升高, DF 改性效果改善; 当菌种接种量过多时, 菌种发酵前期生长过快, 消耗了大量的氮素和可溶性糖类, 并产酸过多, 影响了菌种的代谢和纤维素酶分泌, 导致 DF 改性动力不足, 不利于 SDF 产率的提高, 菌种生长繁殖过程中会消耗一定量的 SDF, 一定程度上影响了 DF 的改性效果。例如, 李静等^[68]在用植物乳杆菌对香菇柄进行发酵时确定其最佳接种量为 1.5%, 但当接种量大于 5% 时, SDF 的产率明显下降; 杜斌等^[69]采用植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌 1:1 混合菌种发酵蓝莓, 确定其最佳接种量为 12%。

2.3.3 发酵原料 选择的发酵原料不同, DF 的改性效果有所差异, 目前, 发酵过程中的 DF 原料多来自于含有丰富 DF 的谷类(如麦麸、豆渣、小米等^[70])、

果渣^[34-37]或其它副产品。原料不同, 其中所包含的营养成分不同, 对微生物生长繁殖的影响也不同。例如, 李静^[71]采用黑曲霉发酵改性香蕉皮 DF 后得到的 SDF 产率为 12.83%, 但当黑曲霉发酵改性豆渣 DF 时, SDF 得率为 37.84%^[72]; 熊俐等^[73]和朱妞^[74]均采用绿色木霉发酵分别对黄豆渣 DF 和苹果渣 DF 进行改性, 得到 SDF 得率分别为 12.03% 和 30.27%。

2.3.4 发酵 pH 微生物菌群不同, 其生长繁殖的最适 pH 范围不同, 例如, 乳酸菌、酵母和霉菌生长的最适 pH 范围分别为 5.5~6.0、5.0~6.0 和 6.0~7.0, 发酵环境 pH 过高或过低, 微生物菌群均不能很好地生长繁殖, 只有营造一个合适的 pH 环境, 菌种才能更好生长繁殖, 所产生的酶才能更好地达到改性 DF 的效果, pH 值越靠近菌种生长繁殖的适宜 pH, SDF 产率就越高。例如, 杜斌等^[69]确定了混合菌发酵改性蓝莓果渣的最佳发酵 pH 为 6.0; 张雪梅等^[75]利用绿色木霉发酵改性柠檬皮 DF, 确定出最佳的发酵 pH 为 6.3。

2.3.5 发酵温度 与发酵 pH 的作用效果相似, 不同菌群的最适温度也不同, 根据最适生长温度不同, 微生物菌群可分为嗜热菌、中温菌和嗜冷菌三大类, 当发酵温度离最适温度过远, 微生物菌群将处于休眠状态, 生长繁殖受到严重的限制; 随着发酵温度上升, DF 改性中的 SDF 转化率提高, 至最高值后下降; 当发酵温度过高时, 过高的温度可以致使菌种死亡和纤维素酶失活, 不利于 DF 的微生物发酵改性, 但过高的温度可加快 IDF 化学键的断裂, 产生一定量的 SDF。例如, 熊俐等^[73]确定了绿色木霉发酵改性桂圆壳的最适温度为 50 ℃; Rodríguez 等^[76]采用酿酒酵母固态发酵苹果渣的最优温度为 29.5 ℃; 牛广财等^[42]优化了乳酸菌发酵改性沙果渣的工艺, 得出乳酸菌的最佳发酵温度为 40 ℃; 而司方等^[77]发现, 发酵温度超过绿色木霉的适宜生长繁殖温度(50 ℃)后, SDF 的产率依旧增加, 阐释了菌种的最适生长温度并不一定是最优的改性温度。

2.3.6 发酵时间 时间也是影响微生物发酵改性 DF 的因素之一。发酵过程中菌群种类的选择不同, 整个发酵过程所需要的时间也有所差异^[78]。发酵初期, SDF 转化率极低, 随着发酵时间的延长, 菌株大量繁殖, 分泌出的纤维素酶量增加, 加快了 IDF 向

SDF 的转化, SDF 转化率增加至最大, 随着发酵时间的继续延长, 原料中的营养成分逐渐减少, 次级代谢产物与有害物质逐渐增加, 基质中代谢产物过多, 菌株生长繁殖速度下降, 产酶量下降, 并消耗了一定含量的 SDF, SDF 转化率整体下降。例如, 王宏勋等^[79]利用药用真菌发酵葛根所需的最佳时间为 30 h; 绿色木霉发酵改性桂圆壳的最佳时间为 58 h^[69]。

3 微生物发酵改性膳食纤维的应用

微生物发酵改性后的 DF 中 SDF 含量较高, 这些高含量的 SDF 赋予了微生物发酵改性 DF 较高的应用价值, 使其在食品、医药方面具有广泛的应用, 在包装材料方面有很大的发展潜力。

3.1 食品方面的应用

由于 SDF 具有持水力强、粘性小和低 pH 下稳定^[80-82]等特点, 经过微生物发酵改性的 DF 会展现出 SDF 的特性, 适量地添加发酵改性 DF 可赋予食品较好的感官和功能性质; 微生物发酵改性后的 DF 安全性高, 人体食用了富含 DF 的食物后, 心血管疾病、各种癌症和 2 型糖尿病的发病风险大大降低, 故改性后 DF 在食品方面的应用很广泛。当改性后 DF 应用于无脂及低脂的食品体系, 能防止低脂食品脱水收缩, 有利于产品口感和质地的改善^[83], 在酸奶、牛奶、糖果、水果馅料和饮料等低脂及无脂产品中具有较大的应用潜力。当 DF 与益生菌混合培养后, 不仅改性后 DF 的抗氧化性、酚类结合力有所增加, 还提高了益生菌的热稳定性和耐胃消化能力, 可作为益生菌的良好载体, 添加到各类发酵产品中^[84]。例如 Hashim 等^[85]在牛奶中添加 3% 大枣 DF, 经过乳酸菌发酵后, 酸奶的质地和色泽增加, 酸度降低; 同样, Jelena 等^[86]在牛奶中添加了 1.5% 的小黑麦 IDF, 经过乳酸菌发酵后, 酸奶的脱水度、粘度、触变性和屈服应力等得到了极大的改善。高脂高糖食品体系中, 改性后 DF 可以作为食品乳化剂, 增加水相和油相的有效混合, 利于高脂高糖食品质地和口感的改善, 同时, 加热过程可促使改性 DF 与脂肪酸发生美拉德反应, 重新赋予产品独特的风味和色泽, 利于产品整体品质的提高^[87]。例如, Somaie 等^[88]在塔夫顿面包中添加 15% 的酵母菌改性的麦麸 DF, 发现面包的货架期延长, 且滋味、风味和整体接受度均有所改善; Li 等^[89]研究发现添加了 0.5% 发酵麦麸 DF 的曲奇具有更酥脆的口感。改性后 DF 添加到液体饮料中, 可作为食品乳化稳定剂和增稠剂, 能提高饮料的稳定性、分散性, 避免饮料分层现象出现^[90]。

3.2 医药保健方面的应用

微生物发酵改性的 DF 生物活性较强, 具有降固醇、缓解便秘、预防结肠癌和治疗糖尿病等功效, 在医药保健方面具有广泛的应用。例如, Lin 等^[91]研究了黑曲霉和粗糙脉孢菌混合菌发酵改性豆腐渣 DF 的降血脂效果发现, 改性后的 DF 能显著降低小鼠血清总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、甘油三酯和动脉粥样硬化指数, 对高胆固醇小鼠的高血脂症具有

重要的预防作用; 司方^[77]研究发现绿色木霉发酵改性的大豆渣 DF 不仅具有较高的持水性、溶胀性, 更具有较好的益生元特性, 能够促使双歧杆菌的大量增殖, 在结肠癌和糖尿病预防方面具有较好的疗效。目前, 医药保健市场 DF 产品多以咀嚼片、泡腾片或冲剂的形式出现, 主要涉及减肥和缓解便秘的功能应用^[92]; 其中, 减肥方面, 安利纽莱来的果蔬纤维素片是 DF 减肥产品市场推广最为成功的案例之一, 且市场上减肥代餐粉、减肥泡腾片等天然减肥产品的主要天然成分也为 DF^[93-95]; 便秘的治疗方面, 不少公司和个人也开发出了能够治疗便秘的 DF 产品^[96-97]。除此之外, 凭借较强的化学结构稳定性和多酚结合能力, DF 是结肠靶向多酚较好的输送系统, 由于微生物改性后 DF 的持水性增强, 多酚-改性 DF 胶囊的生物吸收率增强, 多酚增效^[98]。

3.3 可生物降解包装方面

由于 DF 安全性和稳定性好, 适合与食品或药品直接接触, 当 DF 与其它成膜成分如甘油、淀粉、糊精混合成膜后, 生成的膜不仅阻水性能和柔韧性良好, 且具有一定的抗紫外线性和生物降解性, 能够满足可生物降解包装的要求^[99-101], DF 生物可降解包装纸的研究已经成为了人们研究的热点之一。但由于微生物发酵改性 DF 技术目前尚不成熟, 因此在可生物降解包装方面的应用尚未涉略, 现下用于可食包装方面的改性 SDF 多为化学改性或酶法改性, 如 Wang 等^[102]通过比较胶体磨、低压均质和高压均质等三种方法改性的金针菇 IDF 的成膜性质, 发现高压均质金针菇 IDF 的成膜热稳定性, 颜色和透明度更好; Song 等^[103]采用碱法提取膳食纤维制备了一种食用水果蔬菜膳食纤维纸; Himanshu 等^[104]将稻壳和甘蔗渣羧甲基化后, 制成一种可生物降解的薄膜, 该薄膜就有较大的拉伸强度和伸长率, 能用于食品可降解包装; Zhao 等^[105]将碱改性的榴莲皮 DF 置于氯化锂/N, N 二甲基乙酰胺中再生出 DF 膜, 该膜不仅外观良好、表面光滑、透明性好, 还具有较高的硬度和拉伸强度, 且 4 周内土壤中 100% 降解。

4 展望

凭借绿色安全、低廉、有效的特点, 新型发酵技术应用价值的探索越发得到了人们的青睐。随着发酵技术在食品保鲜加工方面的应用, 作为植源性食物重要组成的 DF, 发酵技术保鲜加工食品过程中 DF 性质的变化日益成为了研究的热点之一, DF 发酵改性及其应用研究也因此取得了较大的进展, 但相对于其它 DF 的改性方法, 仍处于起步阶段, 大量的问题有待解决, 例如, 发酵过程中 DF 与食物其他成分的结合状态变化、DF 与发酵菌群的相互关系、发酵改性前后 DF 应用性能的变化机理、DF 发酵过程中的构效变化等均不明确, 制约了发酵 DF 的工业化生产和应用。另外, 利用纳米技术和发酵技术联合改性 DF, 实现其高活性的工业化生产, 势必是 DF 改性研究的重要方向。

参考文献

- [1] WHO Study Group. Diet, nutrition and the preparation of chronic disease[R]. Switzerland, Geneva: WHO, 1991.
- [2] 扈晓杰, 韩冬, 李铎. 膳食纤维的定义、分析方法和摄入现状[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(3): 133-133. [HU Xiaojie, HAN Dong, LI Duo. The definition, analytic methods and intake status of dietary fiber[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2011, 11(3): 133-133.]
- [3] YAN Jinkun, WU Lixia, CAI Wudan, et al. Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 124987.
- [4] 张瀚文, 余秋文, 张一凡, 等. 膳食纤维的生理功能及改性方法研究进展[J]. *农业科技与装备*, 2021(1): 64-65, 68. [ZHANG Hanwen, YU Qiuwen, ZHANG Yifan, et al. Research progress on physiological function and modification method of dietary fiber[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2021(1): 64-65, 68.]
- [5] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2013版)[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 471. [Chinese Society of Nutrition. Dietary Nutrient Reference Intakes of Chinese Residents [M]. Beijing: Science Press, 2014: 471.]
- [6] 黄强, 舒婷, 王钊, 等. 浅谈膳食纤维与健康[J]. *食品安全导刊*, 2018(27): 68. [HUANG Qiang, SHU Ting, WANG Chuan, et al. Discussion on dietary fiber and health[J]. *Food Safety Guide*, 2018(27): 68.]
- [7] 房岩强, 杨海莺, 谢天, 等. 膳食纤维挤压改性研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2): 141-146. [FANG Yanqiang, YANG Haiying, XIE Tian, et al. Research progress on modifications of dietary fiber in extrusion cooking[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(2): 141-146.]
- [8] 刘娅, 戴立勤, 颜海燕, 等. 发酵法活化葡萄皮渣膳食纤维工艺的研究[J]. *中国酿造*, 2008, 3: 35-36, 53. [LIU Ya, DAI Liqing, YAN Haiyan, et al. Research on fermentation technology of dietary fibre activation in grape pomace[J]. *Chian Brewing*, 2008, 3: 35-36, 53.]
- [9] DAI F J, CHAU C F. Classification and regulatory perspectives of dietary fiber[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2017, 25(1): 37-42.
- [10] CUMMINGS J H, MANN J I, NISHIDA C, et al. Dietary fiber an agreed definition[J]. *The Lancet*, 2009, 373(9661): 365-366.
- [11] CHEICKNA, DAOU, HUI, et al. Functional and physiological properties of total, soluble, and insoluble dietary fibres derived from defatted rice bran[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2014, 51(12): 3878-3885.
- [12] 涂宗财, 李金林, 阮榕生, 等. 利用豆渣生产高活性膳食纤维的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(7): 144-147. [TU Zongcai, LI Jinlin, RUAN Roger, et al. Study on production of high activity dietary Fiber from soybean dregs[J]. *Food Science*, 2006, 27(7): 144-147.]
- [13] HIPSLEY E H, Dietary "fibre" and pregnancy toxemia[J]. *British Medical Journal*, 1953: 420-422.
- [14] Hugh T, David A T S, Thomas M S W, et al. Dietary fiber re-defined[J]. *The Lancet*, 1976, 307(7966): 967.
- [15] DEVRIES J W, CAMIRE M E, CHO S, et al. The definition of dietary fiber[J]. *Cereal Foods World*, 2001, 46(3): 112-129.
- [16] DEVRIES J W. On defining dietary fibre[J]. *Proc Nutr Soc*, 2003, 62(1): 37-43.
- [17] LUPTON J R. Dietary reference intake for energy, carbohydrate, fiber, fat, protein and amino acids[R]. Institute of Medicine of the National Academies, 2002.
- [18] JOINT F. Report of the 26th Session of the CODEX Committee on Nutrition and Foods for Special Dietary Use[R]. Journal of food protection, FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, 2004.
- [19] 杨晰茗, 徐红艳, 王超, 等. 酶解改性两种食用菌膳食纤维理化及功能性质比较[J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 32-36, 42. [YANG Ximing, XU Hongyan, WANG Chao, et al. Physicochemical and functional characterization of enzymatic modification of dietary fiber in two edible fungus[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(10): 32-36, 42.]
- [20] TESCH S, GERHARDS C, SCHUBERT H. Stabilization of emulsions by OSA starches[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 54(2): 167-174.
- [21] 马占倩, 郭宇波, 唐文兴, 等. 米糠膳食纤维提取工艺及高纤健康粥配方优化[J]. *粮食科技与经济*, 2017, 42(4): 54-56. [MA Zhanqian, GUO Yubo, TANG Wenxing, et al. Extraction technology of dietary fiber from rice bran and formulation optimization of high fiber healthy porridge[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2017, 42(4): 54-56.]
- [22] 吕秉霖, 袁尔东. 膳食纤维的改性及应用[J]. *粮食深加工及食品*, 2019, 44(3): 78-81. [LV Binglin, YUAN Erdong. Modification and application of dietary fiber[J]. *Grain Deep Processing and Food*, 2019, 44(3): 78-81.]
- [23] 韩克, 张正茂, 邢沁淦, 等. 不同品种马铃薯膳食纤维化学组成及理化性质分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(17): 158-163. [HAN Ke, ZHANG Zhengmao, XING Qinhuai, et al. Compositions and physicochemical properties of dietary fiber extracted from different potato varieties[J]. *Food Science*, 2017, 38(17): 158-163.]
- [24] 刘彩虹, 丁胜福. 膳食纤维在疾病防治中的应用[J]. *医学综述*, 2010, 16(16): 2459-2461. [LIU Caihong, DING Shengfu. Application of dietary fibers in prevention and treatment[J]. *Medical Recapitulate*, 2010, 16(16): 2459-2461.]
- [25] 王璋, 许时婴, 汤坚. 食品化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 366. [WANG Zhang, XU Shiyang, TANG Jian. Food chemistry [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999: 366.]
- [26] 祝渊. 柑橘果实膳食纤维的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. [ZHU Yuan, Studies on Dietary Fiber of Citrus Fruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.]
- [27] 朱妞. 微生物发酵法改性苹果渣膳食纤维理化特性分析[J]. *中国调味品*, 2020, 45(6): 88-91. [ZHU Niu. Analysis of physicochemical properties of apple pomace dietary fiber modified

- by microbial fermentation method[J]. *China Condiment*, 2020, 45(6): 88-91.]
- [28] 张海芳, 李艳, 韩育梅, 等. 酶法改性对马铃薯渣膳食纤维单糖组分及理化性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(1): 60-66. [ZHANG Haifang, LI Yan, HAN Yumei, et al. Effects of different enzymatic modifications on monosaccharide composition and physicochemical properties of dietary fiber from potato pulp[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(1): 60-66.]
- [29] XIROS C, TOPAKAS E, KATAPODIS P, et al. Hydrolysis and fermentation of brewer's spent grain by *Neurospora crassa*[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5427-5435.
- [30] HANEN M F, JAWHAR F, KAMEL W, et al. Enzymatic hydrolysis of pretreated Alfa fibers (*Stipa tenacissima*) using β -d-glucosidase and xylanase of *Talaromyces thermophilus* from solid-state fermentation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 543-553.
- [31] LIN Derong, LONG Xiaomei, HUANG Yichen, et al. Effects of microbial fermentation and microwave treatment on the composition, structural characteristics, and functional properties of modified okara dietary fiber[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 123: 109059.
- [32] TOMAS M, ROCCHETTI G, GHISONI S, et al. Effect of different soluble dietary fibres on the phenolic profile of blackberry puree subjected to in vitro gastrointestinal digestion and large intestine fermentation[J]. *Food Research International*, 2019, 130: 108954.
- [33] WANG Tuoyi, MA Zhongsu. A novel insoluble dietary fiber-based edible paper from Chinese cabbage[J]. *Cellulose*, 2017, 24(8): 3411-3419.
- [34] NEELAMEGAM A, NALLUSAMY S. Production of polyhydroxybutyrate from wheat bran hydrolysate using *Ralstonia eutropha* through microbial fermentation[J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, 237: 13-17.
- [35] VERSPREET J, VAN D W, TOM M, et al. Modification of wheat bran particle size and tissue composition affects colonisation and metabolism by human faecal microbiota[J]. *Food and Function*, 2019, 10(1): 379-396.
- [36] PETROVA P, PETROV K. Lactic acid fermentation of cereals and pseudocereals: Ancient nutritional biotechnologies with modern applications[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1-26.
- [37] GUO Hongwei, CHANG Juan, YIN Qingqiang, et al. Effect of the combined physical and chemical treatments with microbial fermentation on corn straw degradation[J]. *Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies*, 2013, 148: 361-365.
- [38] GUO Wenxin, SHU Yang, YANG Xiaoping. Tea dietary fiber improves serum and hepatic lipid profiles in mice fed a high cholesterol diet[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2016, 71(2): 145-150.
- [39] LAFORTEZA J C, REYES R G, TRINIDAD T P. Dietary fiber contents and its fermentability *in vitro* of *pleurotus ostreatus* cv. Florida Mycelia (*Agaricomycetes*)[J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2020, 22(7): 651-657.
- [40] XUE Zihan, MA Qiqi, CHEN Yue, et al. Structure characterization of soluble dietary fiber fractions from mushroom *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler and the effects on fermentation and human gut microbiota *in vitro*[J]. *Food Research International*, 2019: 108870.
- [41] DONG Ruihong, LIU Shuai, ZHENG Yuting, et al. Release and metabolism of bound polyphenols from carrot dietary fiber and their potential activity *in vitro* digestion and colonic fermentation[J]. *Food Funct*, 2020, 11(7): 6652-6665.
- [42] 牛广财, 符殿滨, 汤华成, 等. 乳酸菌发酵制备沙果渣可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2010, 22(3): 73-76. [NIU Guangcai, FU Dianbin, TANG Huacheng, et al. Study on soluble dietary fiber (SDF) extracting technology from malusasiatica pomace by lactobacillus fermentation[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2010, 22(3): 73-76.]
- [43] 熊俐, 吴士业, 张永刚, 等. 绿色木霉发酵制备黄豆渣膳食纤维的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2010, 46(3): 75-78, 107. [XIONG Li, WU Shiye, ZHANG Yonggang, et al. Research on producing DF by trichoderma aviride fermenting soybean dreg[J]. *Food and Fermentation Teconology*, 2010, 46(3): 75-78, 107.]
- [44] 陈晓媛. 里氏木霉发酵制备油茶粕可溶性膳食纤维[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018. [CHEN Xiaoyuan. Fermentation for preparing oil tea meal soluble dietary fiber by trichoderma reesei [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.]
- [45] WANG Xiuzhuan, ZHANG Yuanyuan, LI Yunbo, et al. Insoluble dietary fibre from okara (soybean residue) modified by yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. *LWT*, 2020, 134(110252): 1-8.
- [46] 解春艳, 周志国, 吴智艳, 等. 茶薪菇发酵对可溶性膳食纤维生物活性的影响[J]. *食品科技*, 2013, 38(8): 163-166. [XIE Chunyan, ZHOU Zhiguo, WU Zhiyan, et al. Effects of fermentation by *Agrocybe* on the activity of soluble dietary fibre[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(8): 163-166.]
- [47] LI Wenhui, JIN Quan, WU Qiaoyu, et al. Effect of a hybrid process, high hydrostatic pressure treatment combined with mixed-strain fermentation, on the quality of the dietary fibre in pickled vegetables[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(6): 2650-2659.
- [48] CHEN Jiajun, HUANG Hairong, CHEN Yia, et al. Effects of fermentation on the structural characteristics and in vitro binding capacity of soluble dietary fiber from tea residues[J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2020, 131: 109818.
- [49] 谭属琼, 谢勇武. 金针菇膳食纤维提取工艺研究[J]. *福建轻纺*, 2015(6): 35-40. [TAN Shuqiong, XIE Yongwu. Study on extraction process of dietary fiber of *Flammulina velutiformis*[J]. *Fujian Textile & Light Industry*, 2015(6): 35-40.]
- [50] 陶俊奎. 竹笋膳食纤维制备与微胶囊化包埋复合及功能性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008. [TAO Junkui. The study on bamboo shoots dietary fiber microcapsule embedment compounding and its functional characteristic[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2008.]
- [51] 赵雪. 四种方法制备的麦麸提取物润肠通便作用比较[D]. 天津: 天津科技大学, 2016. [ZHAO Xue. Laxative effect compar-

- ison of extract wheat bran by four methods[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2016.]
- [52] 李可. 亚麻籽粕膳食纤维的提取工艺研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013. [LI Ke. Study on extraction of dietary fiber from flaxseed meal[D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.]
- [53] 徐灵芝, 黄亮, 李璐, 等. 雷竹笋渣及其膳食纤维的物化特性分析[J]. 中国酿造, 2016, 35(4): 122-126. [XU Lingzhi, HUANG Liang, LI Lu, et al. Physicochemical properties of Phyllostachys praecox dregs and its dietary fiber[J]. Chian Brewing, 2016, 35(4): 122-126.]
- [54] 林德荣. 可溶性膳食纤维提取、理化性质及其生理功能的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2008. [LIN Derong. Study of soluble dietary fiber extracted, the physical and chemical properties and physiological function[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.]
- [55] 胡乔迁, 葛林丽. 膳食纤维改性研究进展[J]. 现代食品, 2017(15): 20-21. [HU Qiaoqian, GE Linli. Research advance on modification of dietary fiber[J]. Modern Food, 2017(15): 20-21.]
- [56] 刘学成. 金针菇膳食纤维提取、改性及应用研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. [LIU Xuecheng. Study on extraction, modification and application of dietary fiber from flammulina velutipes[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.]
- [57] 程明明, 周鹤, 严伟桐, 等. 不同干燥方式对西番莲果皮中湿法改性膳食纤维品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 77-82. [CHENG Mingming, ZHOU He, YAN Weitong, et al. Effect of different drying methods on the quality of dietary fiber by wet modification from passiflora edulis rind[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(5): 77-82.]
- [58] 张明, 马百惠, 吴茂玉, 等. 金针菇菇根膳食纤维蒸汽爆破改性工艺优化研究 [J]. 中国果菜, 2020, 40(5): 32-35, 49. [ZHANG Ming, MA Baihui, WU Maoyu, et al. Optimization on steam explosion modification process of dietary fiber of flammulina velutipes root[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(5): 32-35, 49.]
- [59] 刘学成, 王文亮, 弓志青, 等. 茶树菇膳食纤维改性及理化性质研究 [J]. 食品工业科技, 2020: 1-15. [LIU Xuecheng, WANG Wenliang, GONG Zhiqing, et al. Modification and physicochemical properties of dietary fiber of Camellia sinensis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020: 1-15.]
- [60] 苏玉. 蒸汽爆破-超微粉碎技术对米糠膳食纤维的改性及功能性质的研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019. [SU Yu. Study on modification and functional properties of rice bran dietary fiber by steam blasting-ultramicro-crushing technology[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.]
- [61] 汪楠, 黄山, 张月, 等. 竹笋膳食纤维理化特性及改性技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 353-357. [WANG Nan, HUANG Shan, ZHANG Yue, et al. Research advance on physicochemical properties and modification of bamboo shoot dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 353-357.]
- [62] 吴卫成, 戴建波, 曹艳, 等. 物理改性对甘薯皮膳食纤维含量、多糖组成及其结构的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 490-498. [WU Weicheng, DAI Jianbo, CAO Yan, et al. Effects of physical modification on content, polysaccharide composition and structure of dietary fiber in sweet potato peels[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(3): 490-498.]
- [63] 王成祥, 张美娜, 李婉珍, 等. 青稞膳食纤维的改性工艺研究 [J]. 安徽农学通报, 2020, 26(17): 126-128, 135. [WANG Chengxiang, ZHANG Meina, LI Wanzhen, et al. Study on the modification technology of highland barley dietary fiber[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(17): 126-128, 135.]
- [64] 张光, 吕铭守, 张思琪, 等. 米糠膳食纤维双酶法改性研究 [J]. 包装与食品机械, 2020, 38(5): 13-18. [ZHANG Guang, LÜ Mingshou, ZHANG Siqi, et al. Study on modification of soluble dietary fibers in rice bran by double enzyme method[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(5): 13-18.]
- [65] 李艳芳, 郝建雄, 程永强, 等. 黑曲霉和米曲霉发酵改善豆渣口感[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 248-253. [LI Yanfang, HAO Jianxiong, CHENG Yongqiang, et al. Improvement of okara mouthfeel by Aspergillus niger and Aspergillus oryzae fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 248-253.]
- [66] 袁惠君, 赵萍, 巩慧玲. 微生物发酵对马铃薯渣膳食纤维得率及性质的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2005(5): 75-77. [YUAN Huijun, ZHAO Ping, GONG Huiling. Effect of microbe fermentation on availability and properties of dietary fibre of potato dreg[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005(5): 75-77.]
- [67] 赵泰霞, 朱杏玲. 微生物发酵法提取大豆渣膳食纤维的研究 [J]. 武夷学院学报, 2016, 35(3): 18-22. [ZHAO Taixia, ZHU Xingling. A study on the extraction of soybean dietary fiber with fermentation method[J]. Journal of Wuyi University, 2016, 35(3): 18-22.]
- [68] 李静, 王安建, 刘丽娜, 等. 植物乳杆菌发酵法制取香菇柄膳食纤维的研究 [J]. 保鲜与加工, 2017, 17(2): 83-88. [LI Jing, WANG Anjian, LIU Lina, et al. Preparation of dietary fiber from lentinus edodes stipe by lactobacillus plantarum fermentation[J]. Storage and Process, 2017, 17(2): 83-88.]
- [69] 杜斌, 冯军, 李苗苗, 等. 发酵法制取蓝莓果渣可溶性膳食纤维工艺优化及其特性分析 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 118-123. [DU Bin, FENG Jun, LI Miaomiao, et al. Optimization of fermentation of blueberry pomace for soluble dietary fiber preparation and quality indexes analysis[J]. Food Research and Development, 2020, 41(9): 118-123.]
- [70] KARIMI R, AZIZI M H, SAHARI M A, et al. In vitro fermentation profile of soluble dietary fibers obtained by different enzymatic extractions from barley bran[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2020, 21: 100205.
- [71] 李静. 黑曲霉发酵制备香蕉皮可溶性膳食纤维研究 [J]. 中国食品添加剂, 2015, 5: 137-141. [LI Jing. Study on extraction of soluble dietary fiber from banana peel with Aspergillus niger[J]. Chinese Food Additive, 2015, 5: 137-141.]
- [72] 谢欢, 涂宗财, 张露, 等. 黑曲霉发酵制备高可溶性膳食纤维豆渣工艺优化及其水合性质研究 [J]. 中国粮油学报, 2017,

- 32(4): 116–121. [XIE Huan, TU Zongcai, ZHANG Lu, et al. Process optimization of preparation of soluble dietary fiber bean dregs by aspergillus niger and hydration properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(4): 116–121.]
- [73] 熊俐, 杨跃寰, 曹新志, 等. 微生物发酵桂圆壳制取高水溶性膳食纤维的研究[J]. *中国酿造*, 2011(10): 61–63. [XIONG Li, YANG Yuehuan, CAO Xinzhi, et al. Fermentation production of dietary fiber with high water-soluble capacity from longan shell[J]. *China Brewing*, 2011(10): 61–63.]
- [74] 朱姐. 绿色木霉前发酵工艺提高苹果渣水溶性膳食纤维研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 71–75. [ZHU Niu. Study on improving soluble dietary fiber of apple pomace by fermentation with trichoderma viride[J]. *China Condiment*, 2020, 45(7): 71–75.]
- [75] 张雪梅, 蒲彪, 欧阳玲花, 等. 发酵制取柠檬皮膳食纤维及其脱色工艺研究[J]. *中国酿造*, 2006(1): 26–29. [ZHANG Xue-mei, PU Biao, OU YANG Linghua et al. Research on extraction of dietary fiber from lemon peel by fermentation with Trichoderma viride and the bleaching technique[J]. *China Brewing*, 2006(1): 26–29.]
- [76] RODRÍGUEZ M R, PANDO B R, SUÁREZ V B. Application of central composite design in the fermentation of apple pomace to optimize its nutritional and functional properties[J]. *Acta Alimentaria*, 2018, 47(3): 324–332.
- [77] 司方. 水溶性膳食纤维及功能性饮品的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2010. [SI Fang. Research on water-soluble dietary fiber and functional drinks [D]. Guiyang: Guizhou University, 2010.]
- [78] 令博, 田云波, 吴洪斌, 等. 微生物发酵法制取葡萄皮渣膳食纤维的工艺优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 178–182. [LING Bo, TIAN Yunbo, WU Hongbin, et al. Optimization of microbial fermentation of grape pomace for dietary fiber preparation [J]. *Food Science*, 2012, 33(15): 178–182.]
- [79] 王宏勋, 王岩岩, 毛一兵, 等. 粉葛渣膳食纤维生物改性研究[J]. *食品工业科技*, 2007(7): 101–102, 106. [WANG Hongxun, WANG Yanyan, MAO Yibing, et al. Study on bio-modification of dietary fibre from Radix puerariae residue[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007(7): 101–102, 106.]
- [80] UI AIN H B, SAEED F, AHMED A, et al. 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): 13917.
- [81] SURESH H, ZHOU J, HO V. Low viscosity soluble dietary fibre for gastroparesis sufferers[J]. *American Journal of Gastroenterology*, 2019, 114: 676.
- [82] LI Na, FENG Ziqian, NIU Yuge, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 557–565.
- [83] APORELA-PALACIOS A, SOSA-MORALES M E, VELEZ-RUIZ J F. Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium[J]. *Journal of Texture Studies*, 2005, 36(3): 333–349.
- [84] HE Caian, SAMPERS I, RAES K. Dietary fiber concentrates recovered from agro-industrial by-products: Functional properties and application as physical carriers for probiotics[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106175.
- [85] HASHIM I B, KHALIL A H, AFIFI H S. Quality characteristics and consumer acceptance of yogurt fortified with date fiber[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92 (11): 5403–5407.
- [86] JELENA M, NIKOLA T, BILJANA D, et al. Application of new insoluble dietary fibers from triticale as supplement in yoghurt - effects on physicochemical, rheological and quality properties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(4): 1291–1299.
- [87] 王锐平, 陈雪峰, 雷学锋, 等. 苹果渣膳食纤维桃酥的研制[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(8): 135–136, 138. [WANG Ruiping, CHEN Xuefeng, LEI Xuefeng, et al. Processing of crisp cake enriched with apple pomace dietary fiber[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, 27(8): 135–136, 138.]
- [88] SOMAIE R, MOHAMMAD A N, TAYEBEH H. Effect of fermentation process, wheat bran size and replacement level on some characteristics of wheat bran, dough, and high-fiber Tafton bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 85: 56–61.
- [89] LI Qian, LIU Rui, WU Tao, et al. Soluble dietary fiber fractions in wheat bran and their interactions with wheat gluten have impacts on dough properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(46): 8735–8744.
- [90] 安艳霞, 董艳梅, 张剑, 等. 膳食纤维的功能特性及在食品行业中的应用与展望[J]. *粮油与饲料工业*, 2019(6): 30–33. [AN Yanxia, DONG Yanmei, Zhang Jian, et al. Functional properties of dietary fiber and its application in the food industry[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2019(6): 30–33.]
- [91] LIN Derong, WU Jingjing, YANG Yuanmeng, et al. The anti-lipidemic role of soluble dietary fiber extract from okara after fermentation and dynamic high-pressure microfluidization treatment to Kunming mice[J]. *Food Sci Technol*, 2020, 57(11): 4247–4256.
- [92] 不公告发明人. 一种用于缓解便秘的海藻冻: 中国, 109105840A[P]. 2019-01-01. [Unannounced invention. A kind of seaweed jelly for relieving constipation: China, 109105840A[P]. 2019-01-01.]
- [93] 钟春燕, 钟宇光. 一种细菌纤维素减肥代餐食品: 中国, 102309010A[P]. 2012-01-11. [ZHONG Chunyan, ZHONG Yu-guang. A diet replacement food with bacterial cellulose: China, 102309010A [P]. 2012-01-11.]
- [94] 赵红霞, 刘彪. 一种具有减肥功能的纤维素泡腾片: 中国, 103054127A[P]. 2013-04-24. [ZHAO Hongxia, LIU Biao. A kind of cellulose effervescent tablet with weight loss function: China, 103054127A [P]. 2013-04-24.]
- [95] 张素英. 超高纤维素减肥食品: 中国, 1328780[P]. 2002-01-02. [ZHANG Suying. Ultra-high cellulose food for weight loss: China, 1328780 [P]. 2002-01-02.]
- [96] 不公告发明人. 一种用于便秘药物组合物及其制备方法: 中国, 106511606A[P]. 2017-03-22. [Unannounced invention. A drug composition for constipation and its preparation method: China, 106511606A[P]. 2017-03-22.]
- [97] 徐浩. 预防和治疗便秘的膳食纤维素保健品及其制备方法:

- 中国, 1891077[P]. 2007-01-10. [XU Hao. Dietary cellulose health products for prevention and treatment of constipation and its preparation method: China, 1891077 [P]. 2007-01-10.]
- [98] TANG Hsi-Yang, FANG Zhongxiang, KEN Ng. Dietary fiber-based colon-targeted delivery systems for polyphenols[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 100: 333–348.
- [99] SANTOS B D , KAREN D , JACINTO A A, et al. Influence of sugarcane bagasse fiber size on biodegradable composites of thermoplastic starch[J] J Renew Mater, 2018, 8(2): 176-182.
- [100] JAMILE C C, JOSENAI D S, ROSEANE S O, et al. Production of biodegradable starch nanocomposites using cellulose nanocrystals extracted from coconut fibers[J]. Polimeros, 2017, 27(4): 320–329.
- [101] PABLO B, RUBÉN P, CAROLINA P, et al. Biodegradable polymer compounds reinforced with banana fiber for the production of protective bags for banana fruits in the context of circular economy[J]. Agronomy, 2021, 11(242): 1–26.
- [102] WANG Wenhong, ZHANG Kai, LI Cong, et al. A novel biodegradable film from edible mushroom (*F. velutipes*) by product-Microstructure, mechanical and barrier properties associated with the fiber morphology[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 153–160.
- [103] SONG Chunli, ZHANG Jie, JIANG Chengyinng, et al. Method for preparing edible fruit and vegetable dietary fiber paper: China, 101363201A[P]. 2009-02-11.
- [104] HIMANSHU G, HARISH K, MOHIT K, et al. Synthesis of biodegradable films obtained from rice husk and sugarcane bagasse to be used as food packaging material[J]. Environ Eng Res, 2020, 25(4): 506–514.
- [105] ZHAO Guili, LYU Xiaomei, Jaslyn Lee, et al. Biodegradable and transparent cellulose film prepared eco-friendly from durian rind for packaging application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 21(100345): 1–6.