

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.60025

膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展

Research progress in physicochemical properties and modification methods of dietary fiber

陈思妤¹ 焦叶¹ 崔波² 方芳¹CHEN Si-yu¹ JIAO Ye¹ CUI Bo² FANG Fang¹杨进洁³ 程云辉^{1,2}YANG Jing-jie³ CHENG Yun-hui^{1,2}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 齐鲁工业大学[山东省科学院]

食品科学与工程学院, 山东 济南 250353; 3. 烟台双塔食品股份有限公司, 山东 烟台 265404)

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250353, China; 3. Yantai Shuangta Food Co., Ltd., Yantai, Shandong 265404, China)

摘要:介绍了膳食纤维的分类、结构及理化特性,综述了国内外近年来关于膳食纤维改性方法及其理化特性的相关文献,并对膳食纤维理化特性及其改性方法的发展方向进行了展望。

关键词:膳食纤维;改性方法;理化特性

Abstract: This review introduced the classification, structure and physical and chemical properties of dietary fiber, and summarized the relevant research literature on the modification methods and physicochemical properties of dietary fiber at home and abroad in recent years. The development direction of the physicochemical properties of dietary fiber and its modification methods were also prospected, in order to provide a theoretical reference for its efficient and comprehensive utilization.

Keywords: dietary fiber; modification method; physicochemical properties

膳食纤维被认为是第七大营养素,具有改善肠道菌群和减少肥胖、糖尿病和心血管等疾病的发病率的生理活性^[1-3],这些生理活性不同程度地受到了膳食纤维理化特性的影响,如膳食纤维的葡萄糖吸附能力大小会影响其降血糖水平,其水合能力与其对肠道的调节密切相关。在食品加工领域,由于具有水合性、持油性和流变特

性等理化特性,膳食纤维常被用作饮料制品中的稳定剂与增稠剂、焙烤制品中的膨松剂和脂肪填充剂等。可溶性膳食纤维含量高低是评价膳食纤维的重要指标^[4],随着可溶性膳食纤维含量的增加,水合特性、流变特性等这些理化性质会随之改善,通常来说,可溶性膳食纤维含量在 10% 以上的具有更加优良的理化特性^[5]。然而,天然膳食纤维中可溶性膳食纤维含量基本都低于 10%,大大影响了其持水性、流变性等理化特性,致使含膳食纤维食品的口感和组织结构较差,限制了其在食品加工领域的广泛应用。研究拟对膳食纤维的种类、组成、结构及理化特性进行介绍,综述近年来国内外有关膳食纤维的改性方法及其理化特性的改性效果研究成果,旨在为膳食纤维的开发与应用提供理论依据。

1 膳食纤维的分类及结构

1.1 膳食纤维的分类

1.1.1 根据溶解性分类 根据溶解性,膳食纤维通常可分为可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维^[6]。可溶性膳食纤维是指可溶于水并能被大肠中微生物酵解的一类膳食纤维,主要包括果胶、瓜尔胶和可溶性半纤维素等;不可溶性膳食纤维是指不溶于水且不能被大肠中微生物酵解的一类膳食纤维,主要包括不溶性半纤维素、纤维素和木质素。可溶性膳食纤维一般具有更加疏松的结构以及更多活性基团,比不溶性膳食纤维具有更优良的水合特性、持油性和吸附能力等理化特性。

1.1.2 根据来源分类 根据来源,膳食纤维可分为天然和合成两大类^[6]。天然类膳食纤维又可以分为植物类膳

基金项目:长株潭国家自主创新示范区专项(编号:2018XK2007)

作者简介:陈思妤,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:程云辉(1964—),女,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: cyh@csust.edu.cn

收稿日期:2022-03-06

食纤维、动物类膳食纤维、微生物类膳食纤维。植物类膳食纤维主要包括纤维素、半纤维素、木质素、半乳甘露聚糖等,主要来源于植物的根、茎、叶。动物类膳食纤维主要包括壳聚糖、甲壳素等,主要来源于动物的表皮或甲壳动物的壳。微生物类膳食纤维主要包括黄原胶等,是由微生物以碳水化合物作为主要原料,经发酵技术产生的。合成类膳食纤维主要包括羧甲基纤维素、甲基纤维素等,主要是采用天然纤维素通过化学接枝等手段合成。

1.1.3 根据聚合物结构分类 根据聚合物的结构,膳食纤维可以分为同质性和异质性两类^[7]。同质膳食纤维由单一的生物聚合物组成,如纤维素、果胶、阿拉伯糖和木质素;而异质膳食纤维由几种类型的生物聚合物组成,如纤维素、纤维素-木质素、半纤维素-纤维素-木质素、蛋白质-多糖复合物等。

1.2 膳食纤维的组成及结构特征

膳食纤维的组成和结构决定了其理化特性,组成和结构的变化直接影响其理化特性,如亲水基团数量会影响其水合特性,粒径和比表面积大小会影响其持油性和吸附性能等。

1.2.1 膳食纤维的组成 可溶性膳食纤维主要由果胶、阿拉伯胶、卡拉胶、树胶等胶类物质和半乳甘露聚糖、葡聚糖、木聚糖、微生物多糖、藻类多糖等多糖类物质组成;而不溶性膳食纤维主要由纤维素、木质素、原果胶和壳聚糖等组成。膳食纤维的单糖组成主要包括葡萄糖、甘露糖、木糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸。膳食纤维分子中的活性因子如 β -葡聚糖和表面亲水基团如羟基、羧基等的数量会影响其吸附能力以及水合特性^[8]。

1.2.2 膳食纤维的结构特征 膳食纤维一般呈大小不规则、无固定形状的片状或颗粒状结构,整体呈无定形分散状,且表面往往存在孔隙和褶皱,有的表面会存在一些细小颗粒,有些会呈疏松的网状空间结构。这些结构特征使膳食纤维具有持水、持油和吸附能力等理化特性^[9]。其结构的改变也会影响这些理化特性,膳食纤维的粒径大小、比表面积以及孔隙结构与水合特性和持油性等密切相关^[10],粒径小、比表面积大、孔隙结构多的膳食纤维,其水合特性、持油性、流变特性以及吸附能力等理化特性会更优良。

2 膳食纤维的理化特性及其对产品品质的影响

2.1 水合特性

膳食纤维的水合特性具体表现为持水能力和溶胀能力,水合特性与亲水基团以及致密的多孔网状结构密切相关^[11]。当膳食纤维的比表面积和亲水基团增加时,水合特性得到改善。持水能力高的膳食纤维可以锁定食品中更多水分,稳定食品的形态,减少焙烤类制品因脱水而

引起的皱缩。另外,优良的水合性质还可以增加人体的饱腹感,影响食欲,达到减肥的目的。

2.2 持油性

持油性通常与膳食纤维颗粒的表面性质密切相关^[12],如比表面积和孔隙率等;此外还与膳食纤维的成分有关,膳食纤维中的木质素和非淀粉多糖对脂类具有亲和性质。高持油性的膳食纤维可以防止烹饪过程中脂肪的流失,显著改善食品的风味和口感,并使高脂食品更稳定,有助于延长保质期^[13]。

2.3 吸附能力

膳食纤维可以吸附葡萄糖、胆固醇、胆汁酸、亚硝酸盐等,并使其随之排出体外,减少人体对其吸收过量,从而有助于人体健康。另外,它还可以吸附铅离子、镉离子等有毒有害物质。一般结构松散、比表面积大、极性基团多、空间位阻更少的膳食纤维具有更强的吸附能力^[14]。pH值也与吸附能力密切相关,研究^[13,15]发现在pH 7的环境中膳食纤维对亚硝酸盐和胆固醇的吸附能力比pH 2的更强。另外,外部的反应条件,如时间、样品浓度、温度等也会对膳食纤维的吸附能力产生影响。

2.4 流变特性

流变特性是指材料在外力作用下产生的相对运动,同时伴随因结构变化引起形变的性质,受样品浓度、温度、溶剂、粒度、表面积和加工条件等因素的影响^[16]。膳食纤维常通过表观黏度、储能和损耗模量、活化能等指标来分析其流变特性。目前对于膳食纤维流变特性的研究主要集中在果胶、树胶、葡聚糖等,研究^[17]表明膳食纤维的流变特性可能会随着粒径大小、比表面积和分子结构等的变化而变化。流变特性是食品加工中的关键影响因素之一,与食品加工过程及制品性质密切相关^[18],如将高果胶含量的膳食纤维加入面团中,可以增加面团的黏弹性;将高可溶性膳食纤维含量的膳食纤维加入酱料类食品中,可以提高其稠度等。

3 膳食纤维的改性方法及改性效果

膳食纤维的改性方法有物理改性、化学改性、生物改性以及多种方法联合改性处理。不同改性方法处理后膳食纤维的组分和结构特征会有不同的改变,从而对膳食纤维的水合特性、持油性、吸附能力等理化特性产生影响^[19]。

3.1 物理方法

物理方法改性主要是通过外界施加的高温、高压、瞬时减压、爆炸、高速冲击和剪切等破坏膳食纤维的糖苷键,从而达到改性的目的。

3.1.1 超微粉碎技术 超微粉碎技术是指采用机械和流体动力方法来克服固体的内部凝聚力,从而将颗粒样品粉碎至10~25 μm 的技术。通过将物料粉碎,使其粒径变小,比表面积增大,分布更加均匀,从而改善膳食纤维

的理化特性^[20]。超微粉碎技术已被应用于米糠、豆渣和小麦麸皮等膳食纤维的改性中,经超微粉碎后不溶性膳食纤维粉体的持水能力、溶胀能力、持油能力和溶解性均有不同程度的改善。Bender 等^[21]通过超微粉碎技术改性葡萄渣膳食纤维使其可溶性膳食纤维含量由(4.35±0.35)%显著提高至(14.46±1.66)%。这可能是因为在强剪切机械应力的作用下,膳食纤维粉体平均粒径减小,分散性更好,比表面积和多孔性增加,更多的亲水基团暴露,从而增加了持油能力和水合性能;更多的活性位点的暴露还有利于分子间的吸引,从而产生流动阻力,提高膳食纤维的表观黏度^[20]。超微粉碎技术比较成熟、操作简单、原料利用率高,应用广泛。但需要注意的是,过度粉碎可能会造成细胞过度破坏进而导致持水、持油等性质降低^[21]。

3.1.2 挤压技术 挤压技术是一种结合机械剪切和温度的影响来破坏细胞壁结构的改性技术。挤压改性使分子间的共价键和非共价键被破坏,部分不溶性大分子物质如半纤维素等发生裂解,导致粒径变小,从而达到改善膳食纤维理化特性的目的^[22]。Chen 等^[23]利用双螺杆挤压膨化处理藕节可溶性膳食纤维,当螺杆转速为 12.56 rad/s,料筒温度为 100 °C 时,其持水性和溶胀性分别由(5.67±0.08) g/g 和(6.29±0.14) mL/g 显著提高至(9.53±0.18) g/g 和(8.67±0.23) mL/g;持油性由(1.58±0.12) g/g 显著提高至(2.62±0.09) g/g;乳化稳定性由(51.20±1.18)%显著提高至(64.79±0.98)%。这些理化特性改善是由于挤压处理导致膳食纤维中纤维素和半纤维素的降解,部分不溶性纤维转化为可溶性低聚糖,如阿拉伯木聚糖;以及挤压过程中的机械力会破坏与膳食纤维相关的碳水化合物和蛋白质之间的共价和非共价键,产生更小、更易溶解的分子片段。

此外,微观结构的变化也会影响膳食纤维的理化特性。Qiao 等^[24]通过挤压技术对红薯渣膳食纤维进行改性,其可溶性膳食纤维含量由 9.63% 提高至 29.25%,微观结构发生变化,形成多孔的蜂窝结构,水合性能、持油性和葡萄糖吸附能力得到改善。Guo 等^[5]发现挤压膨化改性可以提高大蒜膳食纤维的铅结合能力。挤压技术处理量大、生产效率高,易于连续化生产,但挤压过程中高温可能会对原料的颜色造成破坏^[22]。

3.1.3 蒸汽爆破技术 蒸汽爆破技术的原理是在高温高压的密闭环境下,通入的水转化为水蒸气,进入物料内部,使细胞膨胀破碎,致使膳食纤维微观结构被破坏。蒸汽爆破技术能耗低、效率高、绿色环保,是近年来新兴的改性技术之一^[25]。Wang 等^[26]采用蒸汽压力 0.35 MPa,停留时间 121 s 处理红薯渣膳食纤维,可溶性膳食纤维含量比未经处理的提高了 18.78%,达到(22.59±0.35)%,水合特性和持油性也得到改善,可能是由于短链膳食纤维含量增加,引起膳食纤维表面积增加,空间结构更疏

松,孔隙率增加等。Li 等^[25]用蒸汽爆破技术改性豆渣膳食纤维,处理后虽然水溶性显著增加,但水合特性和持油性却下降,可能是由于改性处理使膳食纤维原有的多孔结构遭到破坏,比表面积减小,这种形态结构的变化影响了豆渣的理化特性。

3.1.4 微波技术 微波技术的原理是在电磁波下分子通过偶极旋转和离子传导发生相互作用而产生热能,使被处理样品的溶剂温度迅速升高,同时分子之间的相互作用可能会产生键的振动、断裂,导致样品溶解度增加;另外微波还会增加细胞内的压力,使细胞壁破裂,暴露出更多有效基团^[27]。吴丽萍等^[28]通过在微波功率 600 W 下处理麦麸 4 min,使麦麸膳食纤维多糖分子间的氢键和离子键断裂,形成孔隙,比表面积增大,可溶性膳食纤维含量由 9.92% 提高至 17.06%,其理化特性也随之改善。罗舜菁等^[29]采用微波技术对甘薯渣、苹果渣、大豆渣中的膳食纤维进行改性,改性后 3 种膳食纤维中的可溶性膳食纤维含量分别由(5.07±0.36)%, (16.42±0.22)%, (6.77±0.19)% 提高至(8.27±0.54)%, (7.16±0.28)%, (31.06±0.08)%,由于 3 种不同膳食纤维成分及细胞壁结构的差异,改性后结构及理化特性的改变略有不同,但持水能力和持油能力均显著提高。

3.1.5 动态高压微射流技术 动态高压微射流是一种独特的高压技术,具有高速冲击、高频振动、瞬时降压、空化、超高压等特点,能够对物料微观结构造成破坏。动态高压微射流技术改性主要是通过降低膳食纤维的粒径,提高组织孔隙率,使纤维比表面积增大,更多亲水基团暴露,从而提高膳食纤维水合性能和持油能力。王欢等^[30]利用动态高压微射流改性使豆渣膳食纤维的可溶性膳食纤维含量由 20.43% 提高至 25.84%,改善了豆渣膳食纤维的水合特性和持油性。汤彩碟等^[31]利用动态高压微射流技术处理竹笋膳食纤维,显著改善了其水合特性和持油性,且与处理压力密切相关,当处理压力为 200 MPa 时,纤维表面的范德华力和静电吸引力增大,颗粒发生团聚,减小了对水分和油脂的吸附,水合性质和持油力下降。此外,Morales-Medina 等^[32]通过控制高压微射流的压力和运行次数得到特定粒径分布的豌豆壳纤维悬浮液,其中较小粒径的悬浮液具有假塑性、触变性和黏弹性行为;粒径越小的悬浮液黏度越高,可能是因为粒径降低,粒子的数量增加,使网络结构、静电力和摩擦力的相互作用增加,导致具有高流动阻力。

3.1.6 超声波技术 超声波作用于溶液时会产生空化效应,破坏多糖的化学键,从而破坏碳水化合物的结构,使组织更松散,改变表面亲水性,并进一步引起机械效应和自由基效应。超声波技术处理过程条件温和,通常在常温常压下完成改性,且操作简单,效率高^[33]。牛希等^[34]发现经超声处理后燕麦膳食纤维可溶性膳食纤维含量由(20.57±0.30)% 提高至(31.60±0.75)%,粒径减小,表面

结构更加疏松,孔隙增多且密集,呈蜂巢状,亲水亲油基团暴露,水合特性和持油性均显著提高。胡筱等^[35]用超声波技术分别处理了葵花粕不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维,显著提高了其持水力和持油性,但溶胀能力却降低,可能是由于超声波进一步细化处理导致纤维的多孔结构遭到破坏进而对溶胀能力造成影响。

3.2 化学方法改性

化学方法改性是利用化学反应改变膳食纤维的结构和功能特性,例如碱性过氧化氢处理、羧甲基化和羟丙基化处理。

3.2.1 酸碱处理 用于膳食纤维改性处理的碱一般为氢氧化钠,酸一般为盐酸、硫酸和柠檬酸。Wang等^[19]比较了柠檬酸处理和碱处理对猕猴桃膳食纤维结构和功能特性的影响,酸处理比碱处理具有更高的持水、持油能力以及葡萄糖、胆汁酸和亚硝酸盐结合能力,这主要是因为酸处理后纤维结构更为松散和复杂,而且改性过程中的碱性条件可能会破坏膳食纤维的结构。Karra等^[36]比较了碱处理和直接水处理膳食纤维,发现碱处理后枣椰树花可溶性膳食纤维含量为 $(8.28 \pm 0.21)\%$,是对照组的2.39倍,溶解性和持油能力也明显高于对照组,可能是由于碱处理后纤维表面更加粗糙且不规则,显示出一些不均匀的孔和无序区域,表面性质受到影响。通过酸碱处理改性膳食纤维成本低,但是强烈的酸碱处理可能会导致膳食纤维过度降解^[37]。

3.2.2 碱性过氧化氢处理 在碱性条件下用过氧化氢处理膳食纤维样品粉末,可以降解纤维素,从而改变膳食纤维的组成。荞麦秸秆不溶性膳食纤维^[38]经碱性过氧化氢处理后,持水能力、溶胀能力和持油能力均显著提高。持水能力提高的原因可能是由于碱性过氧化氢处理会破坏半纤维素和纤维素之间的共价键,以及半纤维素与木质素连接起来的醚键,形成更小的聚合物链,结构更疏松,比表面积增大,极性基团暴露较多,致使纤维的持水能力增强。此外,纤维素链断裂时,会产生空间扩展效应,以及暴露出更多的氢键,导致溶胀能力提高。持油能力的增加可能是由于碱性过氧化氢处理后结构松散,纤维的表面积和起皱量增加,表面张力增强,从而增强了对油的捕集能力;由于极性基团增多,内部结构更加开放,具有较大的比表面积,碱性过氧化氢处理也增强了荞麦秸秆不溶性膳食纤维的葡萄糖吸附能力。Feng等^[39]发现改性后黑豆皮可溶性膳食纤维含量由7.8%提高至16.9%,黏度升高,具有更显著的胶凝性能,可能是因为改性后黑豆皮可溶性膳食纤维中半乳糖醛酸残基增多,果胶含量升高,且带较多的负电荷,内部结构较开放,多孔结构丰富。Niu等^[10]采用碱性过氧化氢处理、盐酸—乙醇溶液处理和纤维素酶水解3种改性方法从番茄皮中提取可溶性膳食纤维,也发现碱性过氧化氢处理后膳食纤维胶凝

性能最强,可能是因为碱性过氧化氢处理后番茄皮膳食纤维结构更平坦、更松散,比表面积更大,可以保留更多的水相以形成更强的凝胶。

3.2.3 羧甲基化和羟丙基化 羧甲基化和羟丙基修饰是一种分子修饰方法,将膳食纤维在碱性条件下溶胀,然后通过醚化反应将强亲水基团羧甲基和羟丙基引入到膳食纤维的结构中。这两种改性方法效果好,但是操作步骤复杂,目前常应用于复合改性淀粉中,应用于膳食纤维改性的研究较少。Zhang等^[40]通过羧甲基化改性麦麸不溶性膳食纤维后,显著提高其持水能力、持油能力和葡萄糖吸附能力。Zheng等^[41-42]研究了羧甲基化和羟丙基化对棕榈仁和椰子饼膳食纤维结构和理化性质的影响,发现羧甲基化处理分别使其可溶性膳食纤维含量由 $(3.99 \pm 0.02)\%$ 和 $(7.67 \pm 0.33)\%$ 显著提高至 $(15.84 \pm 0.42)\%$ 和 $(21.67 \pm 2.78)\%$;而羟丙基化处理使其分别显著提高至 $(12.67 \pm 0.52)\%$ 和 $(18.00 \pm 3.17)\%$ 。此外,羧甲基化和羟丙基化改性处理使膳食纤维的持水性和溶胀性得到改善,这些理化特性的改善可能是因为改性后纤维亲水性增强,并呈蜂窝结构,比表面积增加,表面特性得到改善。

3.3 生物方法改性

3.3.1 酶法 膳食纤维改性常用的酶有纤维素酶、半纤维素酶和木聚糖酶等。酶法改性条件较为温和,但因酶价格昂贵且反应时间长,目前工业化应用较少^[43]。Liu等^[15]采用纤维素酶处理米糠膳食纤维,发现水合特性、持油性、胆固醇吸附能力以及葡萄糖吸附能力显著提高。Ma等^[11]采用纤维素酶和木聚糖酶联合改性马铃薯渣膳食纤维,可使其可溶性膳食纤维含量由 $(12.26 \pm 0.41)\%$ 显著提高至 $(30.37 \pm 0.26)\%$,理化特性也随之改善。这可能是由于酶改性破坏了细胞壁,使膳食纤维结构疏松,孔隙率增加,结晶度降低,结合位点暴露更多。

近年来采用多种酶联合改性的研究报道较多,这是因为不同酶有不同的作用位点,相对于单酶改性,多种酶的协同作用可使其酶解效率更高、改性效果更好^[44],如木聚糖酶和纤维素酶复合使用时,不仅可以降解半纤维素,削弱对纤维素的包被,使更多的纤维素暴露出来,同时还可降低纤维素酶与纤维素之间的空间位阻,提高酶与底物的反应速率^[11]。

3.3.2 微生物发酵法 微生物发酵法是通过微生物发酵过程产生的纤维水解酶、半纤维素酶、葡萄糖苷酶、木聚糖酶以及有机酸等代谢产物,使部分纤维素、不溶性半纤维素等水解,转变为可溶性膳食纤维,进而达到改性的目的。常用于膳食纤维改性的发酵菌种有真菌(毛霉、米曲霉、黑曲霉、绿色木霉、红曲霉等)和乳酸菌等。李伟伟等^[45]分别使用黑曲霉、米曲霉、毛霉发酵以及3种真菌结合乳酸菌发酵对豆渣膳食纤维进行改性,均能使其可溶性膳食纤维含量增多,真菌单独发酵中黑曲霉改性效果

最好,可溶性膳食纤维含量由 $(6.12 \pm 0.37)\%$ 提高至 $(20.48 \pm 0.37)\%$,可能是因为黑曲霉发酵产生的纤维素酶和半纤维素酶活性相对较高;而乳酸菌发酵产生的有机酸可以使纤维素进一步分解,黑曲霉联合乳酸菌发酵改性可使豆渣可溶性膳食纤维含量提高至 $(28.24 \pm 0.47)\%$ 。绿色木霉生长速度快、产酶活性高,发酵过程中可产生纤维素酶;陈家俊^[46]利用绿色木霉发酵改性茶渣膳食纤维,发现膳食纤维颗粒表面可形成蜂窝结构,其胆固醇和葡萄糖的吸附能力显著提高。

3.4 联合方法改性

联合方法是指通过两种或两种以上改性方法共同进行改性。Wen 等^[47]比较了纤维素酶、木聚糖酶、微粉化单独处理和酶—微粉化联合处理对米糠膳食纤维结构和功能特性的影响,单独处理和联合处理均能显著提高米糠膳食纤维中可溶性膳食纤维含量,增加其溶胀能力和对胆固醇及胆酸钠的吸附能力,但是酶—微粉化联合处理改性效果更好,可使可溶性膳食纤维含量由 1.5% 提高至 18.7% ;这可能是因为微粉化过程减小了米糠膳食纤维的粒径并增加了其比表面积,从而促进了纤维素酶和木聚糖酶的酶解过程。

Oladunjoye 等^[48]采用微波辅助碱处理甘蔗渣,发现其持水能力和溶胀能力均有不同程度提高,微波辅助加快了反应速度,改善了碱处理改性耗时较长的缺陷。Zheng 等^[49]通过纤维素酶水解与丙烯酸酯接枝相结合的方法改性,使小米麸皮膳食纤维中的可溶性膳食纤维含量由 $(1.04 \pm 0.43)\%$ 提高至 $(19.94 \pm 1.67)\%$,不仅改善了其持水和持油能力,还提高了对胆固醇、胆酸钠、铜离子以及亚硝酸盐离子的吸附能力;这是因为一方面可通过接枝修饰引入亲水性基团来改善膳食纤维的亲水性;另一方面则通过酶水解使多糖链断裂,暴露出更多官能团,使膳食纤维具有更高的吸附能力。多种改性技术的联合应用,系利用不同改性机理对膳食纤维进行改性,有效弥补了单一改性方法的缺点。

4 展望

膳食纤维的理化特性与其组成、结构密切相关,改性可显著改善其水合特性、持油性、吸附能力和流变特性等,这些理化特性的改善可使食品脱水收缩,使高脂食品加工过程中油脂溶出和混合体系食品稳定性等得到有效改善,进而提高含膳食纤维食品的口感、风味、质构和保质期。膳食纤维的不同改性方法各有特点,物理改性方法应用最为广泛,其操作简单、环境友好并易于实现工业化规模制备,但所需设备投入较大;化学改性方法成本低廉,但所用化学试剂排放带来的环境污染及副产物带来的食品安全隐患成为了不可忽视的问题;生物改性方法条件温和,对环境友好,但酶法的较高成本和发酵法的高活力菌种开发成为了其制约因素。后续研究中,由于多

种方法联合应用可以有效弥补单一方法存在的缺陷,联合改性方法将成为研究者们关注的重点;物理改性方法将更关注于可工业化推广的高效改性设备的开发与应用;生物改性方法的工业化应用较大程度上将依赖于高活力、低成本的酶和产酶活性高的新菌种的研究与开发;而化学改性则应聚焦于无食品安全隐患且对环境友好方法的研究与应用。

参考文献

- [1] BISHEHSARI F, ENGEN P A, PREITE N Z, et al. Dietary fiber treatment corrects the composition of gut microbiota, promotes SCFA production, and suppresses colon carcinogenesis[J]. *Genes*, 2018, 9(2): 102.
- [2] LAMBERT J E, PARNELL J A, TUNNICLIFFE J M, et al. Consuming yellow pea fiber reduces voluntary energy intake and body fat in overweight/obese adults in a 12-week randomized controlled trial[J]. *Clinical Nutrition*, 2017, 36(1): 126-133.
- [3] KAWAKITA D, LEE Y A, TURATI F, et al. Dietary fiber intake and head and neck cancer risk: A pooled analysis in the international head and neck cancer epidemiology consortium[J]. *International Journal of Cancer*, 2017, 141(9): 1 811-1 821.
- [4] WANG L, XU H, YUAN F, et al. 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.
- [5] GUO Y, LIU W, WU B, et al. 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.
- [6] MEHTA N, AHLAWAT S S, SHARMA D P, et al. Novel trends in development of dietary fiber rich meat products: A critical review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(2): 633-647.
- [7] ANDROSOVA N, OKUSKHANOVA E, STUART M, et al. Effects of dietary fiber on human health: A review[J]. *Human Sport Medicine*, 2020, 20(1): 106-113.
- [8] 徐燕, 谭熙蕾, 周才琼. 膳食纤维的组成、改性及其功能特性研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(23): 211-218.
XU Yan, TAN Xi-lei, ZHOU Cai-qiong. Composition, modification and functional properties of dietary fiber[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 211-218.
- [9] CHU J, ZHAO H, LU Z, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. *Food Chem*, 2019, 294: 79-86.
- [10] NIU Y, LI N, XIA Q, et al. Comparisons of three modifications on structural, rheological and functional properties of soluble dietary fibers from tomato peels[J]. *LWT*, 2018, 88: 56-63.
- [11] MA Q, MA Z, WANG W, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient: Dietary fiber extracted from potato residue[J]. *LWT*, 2022, 153: 112511.
- [12] YU G, BEI J, ZHAO J, et al. 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.
- [13] GAN J, HUANG Z, YU Q, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105549.
- [14] MA R, CHEN J N, ZHOU X J, et al. Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa L.*) [J]. *LWT*, 2021, 145: 111313.
- [15] LIU Y, ZHANG H, YI C Y, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment [J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128352.
- [16] WANG N, WU L, ZHANG F, et al. Modifying the rheological properties, in vitro digestion, and structure of rice starch by extrusion assisted addition with bamboo shoot dietary fiber[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131900.
- [17] 朱欣岷. 基于高压均质的柑橘纤维理化、流变和显微特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 7-10.
ZHU Xin-di. Research on physicochemical, rheological and microscopic properties of citrus fiber based on high pressure homogenization[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 7-10.
- [18] WANG C C, YANG Z, XING J J, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107008.
- [19] WANG K, LI M, WANG Y, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106162.
- [20] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 15-22.
- [21] BENDER A B B, SPERONI C S, MORO K I B, et al. Effects of micronization on dietary fiber composition, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of grape pomace and its dietary fiber concentrate[J]. *LWT*, 2020, 117: 108652.
- [22] MENIS-HENRIQUE M E C, SCARTON M, PIRAN M V F, et al. Cereal fiber: Extrusion modifications for food industry[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 33: 141-148.
- [23] CHEN H, ZHAO C, LI J, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root[J]. *LWT*, 2018, 93: 204-211.
- [24] QIAO H, SHAO H, ZHENG X, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas Lam.*) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion[J]. *Food Chem*, 2021, 335: 127522.
- [25] LI B, YANG W, NIE Y, et al. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 48-56.
- [26] WANG T, LIANG X, RAN J, et al. Response surface methodology for optimization of soluble dietary fibre extraction from sweet potato residue modified by steam explosion [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(3): 741-747.
- [27] AMINI N, HARITOS V S, TANKSALE A. Microwave assisted pretreatment of eucalyptus sawdust enhances enzymatic saccharification and maximizes fermentable sugar yield [J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 653-660.
- [28] 吴丽萍, 董康珍, 楚文靖, 等. 微波改性对燕麦麸膳食纤维结构及功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 30-37.
WU Li-ping, DONG Kang-zhen, CHU Wen-jing, et al. Effects of microwave modification on the structure and functional properties of dietary fiber from oat bran[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 30-37.
- [29] 罗舜菁, 谢靓, 熊绍百, 等. 微波对膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 30-35.
LUO Shun-jing, XIE Liang, XIONG Shao-bai, et al. Effects of microwave on the structure and functional properties of dietary fiber[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 30-35.
- [30] 王欢, 佟晓红, 刘龄, 等. 高压微射流对生物解离大豆膳食纤维特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 346-352.
WANG Huan, TONG Xiao-hong, LIU Ling, et al. Effects of high-pressure microfluidics on the properties of biodissociated soybean dietary fiber [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 346-352.
- [31] 汤彩碟, 张甫生, 杨金来, 等. 动态高压微射流对方竹笋膳食纤维理化及结构特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 24-29.
TANG Cai-die, ZHANG Fu-sheng, YANG Jin-lai, et al. Effects of dynamic high pressure microfluidics on the physicochemical and structural properties of dietary fiber from bamboo shoots[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 24-29.
- [32] MORALES-MEDINA R, DONG D, SCHALOW S, et al. Impact of microfluidization on the microstructure and functional properties of pea hull fibre[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105660.
- [33] DING Q, LI Z, WU W, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from *Nannochloropsis oceanica*: A comparison of alkaline and ultrasonic-assisted alkaline extractions[J]. *LWT*, 2020, 133: 110080.
- [34] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 130-136.
NIU Xi, SHI Qian-kun, ZHAO Cheng-bin, et al. Effects of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 130-136.
- [35] 胡筱, 潘浪, 朱平平, 等. 超声波改性对葵花粕膳食纤维性质与结构的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 88-99.
HU Xiao, PAN Lang, ZHU Ping-ping, et al. Effects of ultrasonic modification on the properties and structure of sunflower meal dietary fiber[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 88-99.

- [36] KARRA S, SEBII H, YAICH H, et al. 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): e13202.
- [37] ZHANG Y, LIAO J, QI J. Functional and structural properties of dietary fiber from citrus peel affected by the alkali combined with high-speed homogenization treatment[J]. *LWT*, 2020, 128: 109397.
- [38] MENG X, LIU F, XIAO Y, et al. Alterations in physicochemical and functional properties of buckwheat straw insoluble dietary fiber by alkaline hydrogen peroxide treatment[J]. *Food Chemistry*, 2019, 3: 100029.
- [39] FENG Z, DOU W, ALAXI S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 94-101.
- [40] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124983.
- [41] ZHENG Y, LI Y, TIAN H. Effects of carboxymethylation, acidic treatment, hydroxypropylation and heating combined with enzymatic hydrolysis on structural and physicochemical properties of palm kernel expeller dietary fiber[J]. *LWT*, 2020, 133: 109909.
- [42] ZHENG Y, TIAN H, LI Y, et al. Effects of carboxymethylation, hydroxypropylation and dual enzyme hydrolysis combination with heating on physicochemical and functional properties and antioxidant activity of coconut cake dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127688.
- [43] 张帅, 任丽琨, 杨杨, 等. 酶法改性影响膳食纤维的构成及生物作用效果的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1 089-1 098.
- ZHANG Shuai, REN Li-kun, YANG Yang, et al. Research progress of enzymatic modification on the composition and biological effects of dietary fiber[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(4): 1 089-1 098.
- [44] ZHAO X, DONG C. Extracting xylooligosaccharides in wheat bran by screening and cellulase assisted enzymatic hydrolysis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 748-752.
- [45] 李伟伟, 曲俊雅, 周才琼. 真菌及乳酸菌联合发酵对豆渣膳食纤维及理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(11): 159-166.
- LI Wei-wei, QU Jun-ya, ZHOU Cai-qiong. Effects of combined fermentation of fungi and lactic acid bacteria on dietary fiber and physicochemical properties of soybean dregs[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(11): 159-166.
- [46] 陈家俊. 绿色木霉发酵对茶渣膳食纤维的理化性质与降血糖功能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 20-27.
- CHEN Jia-jun. Effects of *Trichoderma viride* fermentation on the physicochemical properties and hypoglycemic function of dietary fiber in tea residues[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 20-27.
- [47] WEN Y, NIU M, ZHANG B, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. *LWT*, 2017, 75: 344-351.
- [48] OLADUNJOYE A O, EZIAMA S C. Effect of microwave-assisted alkaline treatment on physicochemical, functional and structural properties of hog plum (*Spondias mombin* L.) bagasse[J]. *LWT*, 2020, 132: 109821.
- [49] ZHENG Y, WANG X, TIAN H, et al. Effect of four modification methods on adsorption capacities and in vitro hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110565.
- (上接第 233 页)
- [61] 李光荣, 刘欢, 张文祥, 等. 生物保鲜剂结合物理技术在果蔬保鲜中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 383-388.
- LI Guang-rong, LIU Huan, ZHANG Wen-xiang, et al. Progress of bio-preservatives combined with physical technologies in fruits and vegetables preservation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 383-388.
- [62] 丁华, 王建清, 王玉峰, 等. 百里香精油与气调技术联用对草莓货架寿命的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 71-75, 95.
- DING Hua, WANG Jian-qing, WANG Yu-feng, et al. Effect of combination of thyme essential oil and controlled atmosphere on the shelf-life of strawberry[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 37(3): 71-75, 95.
- [63] 黄文部. 微波结合植物精油处理对鲜切西兰花保鲜效果的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018: 31-45.
- HUANG Wen-bu. Study on the preservation effect of microwave combined with plant essential oil on fresh-cut[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019: 31-45.
- [64] BUENDÍA-MORENO L, SÁNCHEZ-MARTÍNEZ M J, ANTOLINOS V, et al. Active cardboard box with a coating including essential oils entrapped within cyclodextrins and/or halloysite nanotubes: A case study for fresh tomato storage[J]. *Food Control*, 2020, 107: 106763.
- [65] BUENDÍA-MORENO L, SOTO-JOVER S, ROS-CHUMILLAS M, et al. An innovative active cardboard box for bulk packaging of fresh bell pepper[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 164: 111171.
- [66] 赵亚珠, 郝晓秀, 孟婕, 等. 百里香精油抗菌包装纸箱对草莓保鲜效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(11): 258-263.
- ZHAO Ya-zhu, HAO Xiao-xiu, MENG Jie, et al. Effect of antimicrobial packaging cartons coated with thyme essential oil on quality and shelf life of strawberries[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(11): 258-263.