

# 不溶性膳食纤维的结构分类、改性方法研究进展

刘璐,王译晗,张智\*

(东北林业大学 生命科学学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 该文重点研究不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)的结构分类、改性方法和改性IDF对食品品质的影响。在结构分类方面, IDF主要包括纤维素类、半纤维素类、木质素类和几丁质类。改性方法主要分为物理改性、化学改性、生物改性和联合改性。不同的改性方法可以改变IDF的结构和性质, 从而对食品品质产生多方面的影响。改性IDF可以增强食品的保水性、降低油脂的吸收、改善食品的质地并提升食品的口感等。未来的研究方向包括深入研究不同改性方法对IDF的影响, 探索改性IDF在不同类型食品中的应用潜力, 并评估改性IDF对人体健康的影响, 为食品工业和营养学领域提供更多有益信息。

**关键词:** 不溶性膳食纤维; 木质素; 纤维素; 半纤维素; 结构分类; 改性方法

## Research Progress on Structure Classification and Modification Methods of Insoluble Dietary Fiber

LIU Lu, WANG Yihan, ZHANG Zhi\*

(College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** This study primarily focused on the structure classification and modification methods of insoluble dietary fiber (IDF) and examined the effect of modified IDF on food quality. In terms of structure classification, IDF mainly includes cellulose, hemicellulose, lignin, and chitin. Modification methods encompass physical, chemical, biological, and combined approaches. These diverse modification methods altered IDF's structure and properties, consequently impacting various aspects of food quality. Modified IDF could enhance the water retention of the food, reduce lipid absorption, and improve the texture and taste. Future research was expected to further investigate the effect of different modification methods on IDF, explore the potential applications of modified IDF in various types of food, and assess the impact of modified IDF on human health. This research aimed to provide valuable insights into the food industry and the field of nutrition.

**Key words:** insoluble dietary fiber; lignin; cellulose; hemicellulose; structure classification; modification method

引文格式:

刘璐,王译晗,张智. 不溶性膳食纤维的结构分类、改性方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 218-224.

LIU Lu, WANG Yihan, ZHANG Zhi. Research Progress on Structure Classification and Modification Methods of Insoluble Dietary Fiber[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 218-224.

随着人们对健康饮食的关注增加, 膳食纤维作为一种重要的营养成分受到了广泛关注, 膳食纤维<sup>[1]</sup>分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。SDF通常存在于植物细胞液和细胞间质中, 主要为多糖及聚糖醛酸类物质, 例如陆生和海洋植物胶。与此不同, IDF主

要为植物细胞壁的结构性组分(包括纤维素、半纤维素、木质素等), 这使得它在食品中更容易获得。同时, IDF在促进肠道健康方面发挥着重要的作用。例如, IDF能够增加粪便的体积和质量, 从而促进肠道的蠕动, 有效预防和缓解便秘问题。此外, IDF还具有增加饱腹感的作用, 有助于人们控制饮食量和进行体重管

作者简介: 刘璐(1994—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 新资源食品加工与利用。

\*通信作者: 张智(1964—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 食品发酵、植物生物转化、功能食品。

理。因此, IDF 在维持肠道健康方面发挥着关键作用, 它为肠道中的有益菌提供营养素, 维持肠道菌群平衡, 同时抑制有害菌的生长。

IDF 作为一种功能性成分, 在食品工业中具有广泛的应用前景。然而, 由于其致密的结构, IDF 的生物活性受到限制, 同时在食品加工过程中存在一些问题, 包括稳定性、溶解性和流变性等限制。因此, 对 IDF 进行改性研究, 以提高其功能性和应用性, 具有重要的意义<sup>[2]</sup>。改性 IDF 作为一种具有广泛应用前景的功能性成分, 已经引起了广泛关注。通过改变纤维的结构和功能特性, 不仅可以提高纤维的稳定性和耐热性, 还可以改善其流变特性和功能性。此外, 改性还能改善食品的口感和质感, 扩大 IDF 在各种食品中的应用领域<sup>[3]</sup>。改性 IDF 的研究将推动食品行业的创新与发展, 满足消费者对食品质量、营养和功能性的需求。在过去的研究中, 我们已经取得了一些重要的进展, 包括了解膳食纤维的功能和作用机制, 探索纤维的结构与性质关系, 以及开发了具体应用案例<sup>[4-5]</sup>。这些研究为改进和推广改性 IDF 的应用奠定了基础, 有望为食品工业提供更多的创新机会, 同时满足消费者对健康食品的不断增长的需求。

## 1 IDF 介绍

### 1.1 IDF 的结构分类

#### 1.1.1 纤维素类

纤维素是由  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键连接的线性均聚物, 纤维素分子由 D-葡萄糖单元通过  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)键连接而成, 这种连接方式导致分子链在空间中的排列具有一定的规律性, 使得分子链能够平行排列形成结晶区。这种排列方式有助于形成有序的晶体结构, 因此纤维素具有高度的结晶度<sup>[6-8]</sup>。纤维素分子不易溶于水, 多数形成了结晶微纤维的形式。这些结晶微纤维相互交织, 形成了纤维素的纤维网络, 构成了植物细胞壁的主要骨架。

#### 1.1.2 半纤维素类

半纤维素是指在结构上类似于纤维素的化合物, 但与纤维素不同的是半纤维素的多糖分子中可能含有其他单糖单元或侧链结构, 一般包括葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖等<sup>[9]</sup>。

#### 1.1.3 木质素类

木质素是一种酚类聚合物, 由对香豆醇、针叶树醇和芥子醇等单体通过自由基诱导缩合形成, 这与纤维素、半纤维素有所不同。木质素主要存在于植物细胞壁的次生部分, 分散在整个次生细胞壁上<sup>[10-11]</sup>。它提供了细胞壁的刚性和耐水性, 起到支持和保护细胞的作用。

#### 1.1.4 几丁质类

几丁质的主要单体是 N-乙酰葡萄糖胺, 通过  $\beta$ -

(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键连接形成线性链, 结构类似于纤维素, 但几丁质的葡萄糖单元上羟基被有乙酰基取代, 同时几丁质分子中的葡萄糖胺单元可以通过  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6)键形成分支结构, 分支的存在增加了几丁质分子的复杂性和空间结构, 多存在于真菌细胞壁中<sup>[12]</sup>。

## 1.2 IDF 的改性方法

### 1.2.1 物理改性

物理改性可以改变 IDF 的粒径、微观结构和比表面积, 从而改善其物理化学性质。这种改变是通过施加压力、剪切力或拉伸力等机械力来实现的, 这些力的作用可以导致纤维的组织结构重新排列, 进而改变其物理性质和功能性。例如, 在食品加工中, 改变 IDF 的粒径和结构可以提高产品的感官质量, 并减少烹饪损失。然而, 在实际应用中, 仍需要综合考虑操作条件、处理效果和产品特性等因素。此外, 对于一些特定的物理手段, 如螺杆挤出和蒸汽爆破, 它们在 IDF 改性中的应用仍需要进一步的研究和探索, 以充分发挥其潜力。

#### 1.2.1.1 介质研磨和球磨

介质研磨和球磨是常用的机械力改性方法, 它们可以通过机械力的作用, 使 IDF 颗粒发生碰撞、摩擦和剪切, 从而改变其结构和形态。Ullah 等<sup>[13]</sup>的研究分析了豆渣 IDF 在湿介质研磨过程中的结构特征和理化性质的变化。研究结果显示, 经过 6 h 的研磨处理, IDF 的粒径从最初的 66.7  $\mu\text{m}$  有效地减小到 544.3 nm, 而且在研磨过程延长后, IDF 的粒径保持相对稳定。与此同时, 膨胀力、持水力和表观黏度显著提高。这些观察结果表明, 介质研磨可以使纤维素颗粒的粒径减小, 增加 IDF 与其他成分之间的接触面积, 同时分子间的化学键发生断裂, 使纤维素的分子量减小, 暴露更多亲水基团, 从而影响其表观黏度。另外, 球磨也对 3 种谷麸皮 IDF 结构、理化和功能特性产生了一定影响。球磨处理降低了 IDF 的结晶度, 同时游离酚的含量增加, 分别增加约为 23.4%、8.9% 和 12.2%。此外, 持水力、葡萄糖延迟能力以及葡萄糖、胆酸钠和胆固醇的吸附能力有所增加<sup>[14]</sup>。这些变化可能是由于球磨处理过程中, 纤维素颗粒发生碰撞、摩擦和剪切, 导致纤维素颗粒的结晶度降低, 分子量减小, 比表面积增大, 球磨处理可能增加 IDF 的表面活性基团数量, 从而影响了其在吸附和释放等方面的性质。

#### 1.2.1.2 动态高压微流化

动态高压微流化是一种机械力改性方法, 通过强烈的剪切、空化和高频振动, 对 IDF 的微观结构进行破坏, 同时使 IDF 颗粒更细小、分布更均匀。Geng 等<sup>[15]</sup>以新鲜玉米苞片为原料, 采用高压微流化技术进行改性, 结果显示处理后的新鲜玉米苞片膳食纤维的持水力、膨胀能力和持油力均显著提高。当动态高压微流

压力为 180 MPa 时,与未处理组相比,这些性质分别增加了 75.56%、118.04% 和 78.58%。此外,处理后的 IDF 的粒径也明显减小。Wang 等<sup>[16]</sup>使用动态高压微流化处理了来自大豆残渣的 IDF,并通过体外胃肠模拟模型确定压力对 IDF 的  $\text{Pb}^{2+}$  吸附容量。研究结果显示,当压力达到 80 MPa 时,IDF 的  $\text{Pb}^{2+}$  吸附容量达到最大值 $[(261.42 \pm 2.77) \mu\text{mol/g}]$ ,比未处理样品 $[(233.47 \pm 1.84) \mu\text{mol/g}]$ 高出 1.13 倍。这些改性效果是由于动态高压微流化过程中施加的高压力引发了 IDF 颗粒之间的碰撞和变形。这些相互作用力的增加促使颗粒聚集和破碎,导致颗粒的形态和结构发生变化。此外,颗粒之间的摩擦和碰撞会产生热量。这种热效应可以引起颗粒的局部升温,促进纤维素颗粒的物理变化和化学反应。局部升温还可以影响 IDF 的结晶度,从而使持水力、膨胀力、持油力和  $\text{Pb}^{2+}$  吸附能力均显著提高。

#### 1.2.1.3 高静水压

高静水压是通过破坏 IDF 中的非共价键,来改变其结构并使表面出现褶皱的改性方法。这些结构变化有助于增强 IDF 的保水、膨胀和持油能力。在 Yu 等<sup>[17]</sup>试验过程中,高静水压力被证明有效提升胡萝卜 IDF 保水量、水膨胀、保油量、阳离子交换能力和葡萄糖吸附能力。高静水压可以改变 IDF 内部分子之间的相互作用,包括破坏纤维素链上的氢键和范德华力,导致纤维素颗粒的结构松散和分子间距的增加。这样,颗粒之间的压缩和摩擦作用可能会产生局部升温效应。升高的温度可以促进纤维素链的运动和重新排列,从而导致 IDF 的结构发生变化。

#### 1.2.1.4 螺杆挤压和蒸汽爆破

螺杆挤压和蒸汽爆破是两种常用于增加 SDF 孔隙率的方法,目前尚未广泛应用于 IDF。这两种方法分别通过高压剪切和高温高压蒸汽处理原料然后快速降压的方法,可以破坏分子间的化学键,有助于增加 IDF 的孔隙率。皇圆圆等<sup>[18]</sup>利用单螺杆挤压机对豌豆渣进行挤压处理,结果表明,处理后的挤出物膨胀性高于未改性的 IDF。而 Zhai 等<sup>[19]</sup>利用蒸汽爆破处理刺梨果渣,处理后刺梨的 IDF 含量从 $(45.13 \pm 0.23)\%$ 下降到 $(30.01 \pm 0.15)\%$ ,SDF 含量从 $(9.31 \pm 0.07)\%$ 上升到 $(15.82 \pm 0.31)\%$ 。同时,改性后的 SDF 具有更高的热稳定性,IDF 的原有致密结构被破坏,比表面积增加,有效提高了刺梨果渣的利用率。在挤压膨化过程中,将 IDF 通过挤压机进行高温高压挤压处理,然后迅速释放压力,使纤维材料迅速膨胀产生剧烈的物理变化,从而提高了膨胀力。同时,高温高压和剧烈的物理变化可以导致 IDF 的结构破坏并导致其水分蒸发。这些条件促使纤维素链断裂,并释放出纤维素内部的低聚糖分子。这些低聚糖分子具有较小的分子量和较高的溶解性,因此被认为是 SDF。类似地,蒸汽爆破过程

中,高温高压的蒸汽冲击和热效应也可以导致纤维材料的结构破坏和纤维素链的断裂。膳食纤维内部的低聚糖分子也会被释放出来,形成 SDF。

#### 1.2.2 化学改性

化学改性是一种处理 IDF 的方法,通过这种方法,IDF 的性质、结构、表征以及与其他物质的相互作用能力都会发生变化。在化学改性过程中,通常会发生水解与纤维素交联的成分,使其经历酯化、醚化或脱聚等反应。这些反应可以破坏纤维素的结构,使其更容易溶解或与其他成分发生交联反应。此外,化学改性还可以引入更多的羟基或羧基官能团,增加 IDF 的分散性<sup>[20-21]</sup>。化学处理过程中,通常会水解与 IDF 交联的蛋白质和淀粉,导致结晶度增加,微观结构呈现褶皱和粗糙。此外,处理过程中需要注意安全操作,避免对环境与健康造成不良影响<sup>[22]</sup>。

##### 1.2.2.1 酸碱处理

酸处理通常使用酸类溶液(如盐酸、硫酸、柠檬酸)对 IDF 进行改性。祁静<sup>[23]</sup>在研究过程中发现随硫酸浓度的增大,米糠 IDF 的化学组成、表面形态和结构发生的变化。在酸处理过程中发现米糠中的淀粉逐渐被去除,随着硫酸浓度增加,淀粉水解程度也在增加,膳食纤维的持油能力上升,但膳食纤维的持水能力、吸水膨胀能力以及阳离子交换能力下降,这可能是由于其亲水基团逐渐减少,疏水区增加所致,同时非结晶区域减少,热稳定性得以提高。Sang 等<sup>[24]</sup>研究表明,与未改性的柚皮海绵层 IDF 相比,用碱处理的 IDF,分子量降低粒径减小(最小粒径达  $60.63 \mu\text{m}$ ),微观表征呈现蜂窝状空隙结构,同时碱处理的 IDF 在体外吸附试验中显示出最强的葡萄糖吸附能力和胆固醇吸附能力。酸处理过程中可水解 IDF 中的淀粉、蛋白质等,从而提高 IDF 的结晶度,使其热稳定性更强。碱处理常用的碱性溶液如氢氧化钠,碱法改性形成更多的羟基官能团,这些羟基官能团可以与水分子形成氢键,从而增加 IDF 的亲水性,使其吸附能力增强<sup>[25]</sup>。

##### 1.2.2.2 碱-过氧化氢处理

碱-过氧化氢(氢氧化钠和过氧化氢的混合物)处理是一种常用的化学方法。经碱性过氧化氢处理后可以引起 IDF 的氧化反应,对木质素和少量纤维素起到降解作用<sup>[26]</sup>。碱性过氧化氢处理后使 IDF 结构松散,暴露羧基和羟基等官能团,这些官能团的引入可以改变 IDF 的特性。Jiang 等<sup>[27]</sup>研究表明,碱性过氧化氢处理后的人参 IDF 表面起皱,内部结构松散,与未改性的人参 IDF 相比,改性人参 IDF 的持水能力、膨胀力和持油力分别提高了 32.6%、29.8% 和 32.7%。Luo 等<sup>[28]</sup>通过响应面优化方法确定了碱性过氧化氢处理甘蔗渣的最佳工艺条件,使其得到充分利用。甘蔗渣是糖厂的主要副产品之一,但其利用受到高浓度木质素的限

制,碱性条件可以使木质素的芳香环结构发生断裂,从而破坏木质素的多环结构和侧链结构,过氧化氢的氧化作用引起木质素的氧化反应,进一步破坏其结构。这些反应导致木质素的分子量降低并使其结构解聚<sup>[29]</sup>,因此木质素更易于降解和转化为其他化合物,同时,也可以破坏少量纤维素链结构和晶体结构。碱性条件可以使纤维素的结晶区域发生溶解和解聚,使纤维素链更容易断裂。

### 1.2.2.3 羧甲基化

羧甲基化是通过在纤维素中引入羧甲基(carboxymethyl)基团来改性的方法。燕文胜等<sup>[30]</sup>的研究表明,羧甲基化改性处理使连翘 IDF 的持水力降低,持油力显著提高了 21%~53% ( $P<0.05$ ),同时连翘 IDF 膨胀力提高了约 73%。苏靖程等<sup>[31]</sup>的研究表明,改性后羧甲基化 IDF 膨胀力、持水力、持油力、阳离子交换力、亚硝酸盐吸附能力和葡萄糖吸附能力均显著增大 ( $P<0.05$ ),羧甲基化可以增加纤维素的持水性和膨胀性,改善其吸水能力和黏性。这种改性还可以增加纤维素与水、油和其他物质的相互作用力。

### 1.2.3 生物改性

生物改性可以通过酶法或微生物处理等方式改变 IDF 的分子结构,通过酶、微生物产生的酶以及它们的次级代谢产物来酶解某一产物。具体而言,酶或微生物产生的酶能够催化特定的生化反应,将某一产物分解为更小的分子。这可能包括糖苷键的断裂、聚合度的降低、分子量的减小和分支的形成、改变其溶解性等。这些结构的改变可以导致 IDF 的物理特性和功能性质的变化。

#### 1.2.3.1 微生物发酵法

微生物发酵法常用的微生物包括乳酸菌、酵母菌和纤维降解菌等。这些菌种具有特定的酶系统,可以分解 IDF 的结构,进而产生改性效果。Wang 等<sup>[32]</sup>使用马克斯克鲁维酵母对豆渣中的 IDF 进行发酵改性,得到了两种修饰的 IDF,即 MIDF1 和 MIDF2。研究结果显示,发酵改性显著改善了 IDF 的结构和功能性质,提高了其颜色、堆积密度和黏度等特性。经修饰后的 IDF,水合能力、胶凝能力和抗氧化活性等功能特性都得到增强。Liao 等<sup>[33]</sup>使用植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌和枯草芽孢杆菌等微生物菌种进行发酵改性。研究结果显示,发酵改性成功改善了小麦麸中的 IDF 的结构。改性后的 IDF 其保水能力、持油能力、水膨胀能力以及胆酸钠吸附容量和阳离子交换容量等特性都得到改善。此外,发酵改性还提高了 IDF 的抗氧化能力。关玉婷等<sup>[34]</sup>采用粗糙脉孢菌对黑米渣发酵改性,相比未发酵改性的黑米渣膳食纤维,SDF 含量提升了 71.68%,纤维素含量降低了 22.83%,膨胀力、持水力和持油力分别增加了 1.9、2.3、2.6 倍,胆固醇吸附能力、葡萄糖吸

附能力和胆酸钠吸附能力均极显著提升。其原因可能是微生物在发酵过程中产生的酶(如纤维素酶和半纤维素酶等)能够降解 IDF,将其分解成较小的分子,从而改变其形态和性质。同时,微生物发酵产生的代谢产物对 IDF 的功能特性产生影响。例如,发酵过程中产生的有机酸<sup>[35]</sup>和多糖物质<sup>[36]</sup>可以提高 IDF 的持水能力和膨胀力。此外,微生物代谢产物中可能含有具有抗氧化<sup>[37-38]</sup>、抗炎<sup>[39]</sup>和降血脂<sup>[40]</sup>等功能的物质,进一步增强了 IDF 的功能特性。

#### 1.2.3.2 酶法改性

酶法改性 IDF 常用的酶包括纤维素酶( $\beta$ -葡聚糖酶、 $\beta$ -葡糖苷酶组成)、半纤维素酶( $\alpha$ -L-阿拉伯糖苷酶、 $\alpha$ -D-葡萄糖醛酸酶和木聚糖酶等)和其他降解酶(聚糖酶、漆酶、葡聚糖酶),这些酶在酶法改性过程中发挥重要作用<sup>[41]</sup>。Wang 等<sup>[42]</sup>为提高生姜渣利用价值使用多种酶来获得改性姜渣 IDF,保水量,水膨胀量和油结合能力比未改性时分别提高 22.45%、33.85% 和 36.26%。白冉冉等<sup>[43]</sup>用小黄姜姜渣经酶改性处理后获得的 IDF 作为原料,采用复合酶法改性以提高 SDF 含量。通过酶法改性,将 IDF 转化为 SDF,不仅提高膳食纤维的功能性和生物利用度,而且增加了膳食纤维对人体的益处<sup>[44]</sup>。酶能够切断纤维素或半纤维素分子内的键合,使其分解为较小的分子,这些较小的纤维素链具有更高的水溶性和更好的胶凝性,可使得 IDF 的保水量、水膨胀能力和保油能力得到提升<sup>[42]</sup>。

#### 1.2.4 联合改性

联合改性是一种综合利用多种改性方法的改性方式,通过这种方式可以实现多个性能指标的综合改善,其方法的优势在于能够充分发挥各种改性方法的优点,最大限度地提高资源的利用效率。

Zhou 等<sup>[45]</sup>使用碱性溶液(NaOH 溶液)和复合酶(木聚糖酶和纤维素酶)对 IDF 进行改性。扫描电子显微镜显示改性后的表面结构粗糙且疏松。碱性溶液处理和复合酶改性使 IDF 拥有更好的保水能力、水膨胀能力、吸油能力、葡萄糖吸附能力,同时对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制能力增强。Yu 等<sup>[46]</sup>利用酶解-高压静水压法,对泡菜中提取的 IDF 进行处理。结果显示,与未改性 IDF 相比,改性后的 IDF 呈现出多孔、结构更加松散的特点,颗粒尺寸减小。同时,改性 IDF 具有显著的吸油能力、葡萄糖吸附能力、亚硝酸盐吸附能力和胆固醇吸附能力。

#### 1.2.5 改性方法总结展望与意义

分子结构的改变:不同的改性方法可能导致 IDF 的分子结构发生变化。例如,酶法改性可以导致 IDF 中多糖链的裂解或修饰,从而影响其分子大小和分子量分布。酸法改性可能导致 IDF 中的醛基或羧基的引入或改变,这些化学官能团的改变可以影响其水合性

和溶解性。

**晶体结构的改变:**改性可以影响 IDF 的晶体结构。例如,通过高温或高压等物理方法处理 IDF,可以改变其晶体形态,使其晶体结构更加有序或松散。这些晶体结构的变化可以影响 IDF 的溶解性、吸附性和流变特性。

**孔隙结构的改变:**某些改性方法可以引起 IDF 内部孔隙结构的改变。例如,化学改性可能导致 IDF 中的孔隙大小、分布和连通性发生变化。这些孔隙结构的改变可以影响 IDF 的吸附性能和可发酵性。

**表面性质的改变:**改性也可以影响 IDF 的表面性质。例如,改性可以导致 IDF 表面的化学官能团的引入或改变,从而影响其与其他成分的相互作用,如在食品工业中的乳化、稳定性和黏度调控等方面。

**分子间相互作用的变化:**不同改性方法可能引起 IDF 分子间相互作用的变化。这包括氢键、静电相互作用、疏水作用等。这些相互作用的变化可以影响 IDF 的凝胶形成、乳化能力和稳定性。

IDF 的改性方法各有特点,其中物理改性方法应用最为广泛,对环境污染影响相对较小且操作简单易于实现工业化规模制备,但所需设备投入较大;相比于物理改性工业化投入大,化学改性方法有其投入成本更低的特点,但化学试剂的使用和排放给环境造成不可逆的损伤,增加了危害食品安全的隐患和风险;生物改性方法条件温和,对环境友好,但生物改性方法存在微生物发酵高活力菌种开发以及酶法改性成本高的限制条件;联合改性方法有效解决了使用单一方法带来的问题,因此在后续研究中,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。

IDF 的理化特性与其组成、结构密切相关, IDF 的持水性、持油性、吸附能力和流变特性等在改性之后显著改善,这些理化特性的改善不仅使得食品加工过程中高脂食品油脂溶出和混合体系食品稳定性等得到改善,而且有效解决食品脱水收缩的问题。因此,改性在一定程度上提高了含改性 IDF 食品的口感、风味、质构和保质期。

## 2 改性 IDF 对食品品质的影响

添加适量的改性 IDF 可以改善食品的质地和口感,增加食品的口感层次和咀嚼感<sup>[47]</sup>。纤维的存在不仅增加食品的黏性和黏稠度,而且改变了食品的质感,在使用改性纤维时需要控制添加量,适量添加以避免

改性纤维对食品的口感造成负面影响。

Lee 等<sup>[48]</sup>将羧甲基化全麦膳食纤维应用于饼干中,使饼干体积增大且硬度下降,有效降低其硬度和密度。改性 IDF 具有较好的吸水性、保水性、凝胶特性,可以帮助食品保持水分,延长食品的保鲜期,并改善食品的口感。Kumari 等<sup>[49]</sup>对豌豆皮的 IDF 进行酶和挤压改性并添加至酸奶中,改变了搅拌型酸奶流变学特性及黏弹性。李玉栋等<sup>[50]</sup>研究发现面团的吸水率和形成时间与 IDF 含量呈正相关, IDF 的添加增强面团的保水性,同时可以提高产品稳定性,使其在加工和储存过程中更加稳定。这有助于保持食品的质量和稳定性,减少质量损失和变质的风险。尹立晨<sup>[51]</sup>采用高速剪切协同酶解法对豆渣膳食纤维进行改性处理并将膳食纤维添加到冰淇淋中,其理化品质测定结果表明酸奶冰淇淋的浆料黏度、膨胀率升高,融化率降低而稳定性提升。

## 3 未来研究方向的预测

未来的研究方向将聚焦于改性 IDF 的新型改性方法、相互作用、应用扩展以及消费者接受度等方面,以推动改性纤维在食品领域的应用和发展。

1) 新型改性方法:探索新型改性方法,以改善改性 IDF 的性质和功能。例如,利用生物技术或纳米技术等新兴技术,可以实现对纤维的精确调控和功能增强。

2) 纤维与其他成分的相互作用:研究改性 IDF 与其他食品成分(如蛋白质、脂质等)之间的相互作用。这有助于了解纤维在复杂食品系统中的相容性、稳定性和影响,以及其对食品品质和营养的影响。

3) 应用扩展:探索改性 IDF 在更多食品类别中的应用,包括肉制品、乳制品、零食、饮料等。研究人员可以开发新的配方和加工技术,以实现纤维在不同食品中的最佳效果和稳定性。

4) 消费者接受度研究:了解消费者对改性 IDF 食品在接受度和偏好,以及消费者对纤维添加食品的期望和需求。这有助于指导产品开发和市场推广,提高改性纤维食品的市场竞争力。

## 4 结论

本文综述了 IDF 的结构分类和改性方法,并研究了改性 IDF 对食品品质的影响。通过改性, IDF 的性质可以得到改善,从而对食品的质量和口感产生积极影响。物理改性、化学改性、生物改性和联合改性是常用的改性方法,不同的方法对 IDF 的改性效果有所差异。未来的研究可以进一步探索不同改性方法对 IDF 的影响,研究改性 IDF 在不同食品中的应用,以及评估改性 IDF 对人体健康的影响。这些研究将有助于进一步提高食品的营养价值和品质,推动膳食纤维在食品工业中的应用和发展。

## 参考文献:

- [1] 张欣, 邹锦成, 刘琳, 等. 酶法纯化麦麸不溶性膳食纤维的结构及理化性质[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 223-229.  
ZHANG Xin, ZOU Jincheng, LIU Lin, et al. Structure and physicochemical properties of insoluble dietary fiber from wheat bran extracted using the enzymatic method[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 223-229.
- [2] 周新, 唐世英, 杨贺棋, 等. 不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 359-366, 372.  
ZHOU Xin, TANG Shiyong, YANG Heqi, et al. Research progress on isolation, characterization and modification of insoluble dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 359-366, 372.
- [3] 孙元琳, 崔嘉航, 蔡文强, 等. 果蔬膳食纤维生理功能及其作用机制研究进展[J]. 山西农业科学, 2022, 50(11): 1489-1496.  
SUN Yuanlin, CUI Jiahang, CAI Wenqiang, et al. Research progress on physiological function and mechanism of dietary fiber in fruits and vegetables[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 1489-1496.
- [4] 猴珂慧, 杨会婷, 陈飞婷, 等. 不溶性膳食纤维的功能特性及其作用机制研究进展[J]. 食品工程, 2023(2): 1-2.  
GOU Kehui, YANG Huiting, CHEN Feiting, et al. Research progress on functional properties and mechanism of insoluble dietary fiber[J]. Food Engineering, 2023(2): 1-2.
- [5] GAN J P, XIE L, PENG G Y, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106872.
- [6] 刘维华, 毛雷, 郑凤英, 等. 黏胶基植物抗菌纤维赛络紧密纺纱线的开发及性能[J]. 上海纺织科技, 2022, 50(12): 40-43.  
LIU Weihua, MAO Lei, ZHENG Fengying, et al. Development of siro compact spinning yarns of viscose rayon based antibacterial fiber and its performance[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2022, 50(12): 40-43.
- [7] 史格格, 孟家光, 杨露. 棉纤维在 LiCl/DMAc 中的溶解[J]. 印染, 2022, 48(9): 18-21, 58.  
SHI Gege, MENG Jiaguang, YANG Lu. Dissolution process of cotton fiber in LiCl/DMAc system[J]. China Dyeing & Finishing, 2022, 48(9): 18-21, 58.
- [8] 李江琴, 姚凯利, 胡天丁, 等. 纤维素基膜材料的应用研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(6): 6080-6087.  
LI Jiangqin, YAO Kaili, HU Tianding, et al. Advances in the application of cellulose-based membrane materials[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(6): 6080-6087.
- [9] CASTILLO I, GUTIERREZ L, HERNANDEZ V, et al. Hemicelluloses monosaccharides and their effect on molybdenite flotation[J]. Powder Technology, 2020, 373: 758-764.
- [10] 熊兴泉, 张辉, 高利柱. 木质素的功能化与应用研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40(6): 806-819.  
XIONG Xingquan, ZHANG Hui, GAO Lizhu. Progress in chemical modification and application of lignin[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2023, 40(6): 806-819.
- [11] 蔡政, 孙津梁, 刘坤行, 等. 木薯高、低粉品种贮藏根生长关键期的生理生化特性比较[J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(2): 85-92.  
CAI Zheng, SUN Jinliang, LIU Kunhang, et al. Comparison of physiological and biochemical properties of storage roots between high and low starch cultivars of cassava during the critical growth period[J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(2): 85-92.
- [12] 焦婷. 里氏木霉几丁质合成酶 CHSIII 基因对纤维素酶分泌的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.  
JIAO Ting. Effect of chitin synthase CHSIII gene of *Trichoderma reesei* on cellulase secretion[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [13] ULLAH I, YIN T, XIONG S B, 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.
- [14] NIU L, GUO Q Q, XIAO J, et al. The effect of ball milling on the structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from three grain bran[J]. Food Research International, 2023, 163: 112263.
- [15] GENG N N, SONG J F, ZHANG K Y, et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization on the physicochemical and structural properties of insoluble dietary fiber from fresh corn bract[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15710.
- [16] WANG H, HUANG T, TU Z C, et al. The adsorption of lead(II) ions by dynamic high pressure micro-fluidization treated insoluble soybean dietary fiber[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2532-2539.
- [17] YU G Y, 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.
- [18] 皇圆圆, 吴淑华, 李飞, 等. 挤压对豌豆渣不溶性膳食纤维膨胀性和持水性影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(6): 59-64.  
HUANG Yuanyuan, WU Shuhua, LI Fei, et al. Effect of extrusion on swelling and water holding capacity of insoluble dietary fiber from pea residue[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(6): 59-64.
- [19] ZHAI X Y, AO H P, LIU W H, et al. Physicochemical and structural properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* pomace by steam explosion[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(6): 2381-2391.
- [20] TIAN B M, PAN Y Z, WANG J, et al. Insoluble dietary fibers from by-products of edible fungi industry: Basic structure, physicochemical properties, and their effects on energy intake[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 851228.
- [21] BAI X L, HE Y, QUAN B Y, et al. Physicochemical properties, structure, and ameliorative effects of insoluble dietary fiber from tea on slow transit constipation[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100340.
- [22] KHANPIT V V, TAJANE S P, MANDAVGAN S A. Dietary fibers from fruit and vegetable waste: Methods of extraction and processes of value addition[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021, 11: 1-20.
- [23] 祁静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.  
QI Jing. The Research on the preparation and adsorption properties of rice bran fiber with high adsorption capacities[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [24] SANG J Q, LI L, WEN J, et al. Chemical composition, structural and functional properties of insoluble dietary fiber obtained from the Shatian pomelo peel sponge layer using different modification methods[J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 165: 113737.
- [25] 梁志宏, 尹蓉, 张倩茹, 等. 提取方式对枣膳食纤维理化及功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 132-137.  
LIANG Zhihong, YIN Rong, ZHANG Qianru, et al. Effects of extraction methods on physicochemical and functional properties of dietary fiber in jujube[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 132-137.
- [26] LEWIS S M, MONTGOMERY L, GARLEB K A, et al. Effects of alkaline hydrogen peroxide treatment on *in vitro* degradation of cellulosic substrates by mixed ruminal microorganisms and *Bacteroides succinogenes* S85[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1988, 54(5): 1163-1169.
- [27] JIANG G H, BAI X S, WU Z G, et al. Modification of ginseng insoluble dietary fiber through alkaline hydrogen peroxide treatment and its impact on structure, physicochemical and functional proper-

- ties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 111956.
- [28] LUO M Y, WANG C, WANG C S, et al. Effect of alkaline hydrogen peroxide assisted with two modification methods on the physicochemical, structural and functional properties of bagasse insoluble dietary fiber[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1110706.
- [29] 李锋, 毛海立, 曾承露, 等. 菱角壳木质素提取分离及其抗氧化活性评价[J]. 化学试剂, 2022, 44(12): 1768-1774.  
LI Feng, MAO Haili, ZENG Chenglu, et al. Evaluation of antioxidant activity of lignin extracted from water caltrop shell[J]. Chemical Reagents, 2022, 44(12): 1768-1774.
- [30] 燕文胜, 张亮亮, 李焕洋, 等. 化学改性对连翘不溶性膳食纤维理化性质、结构及乳化稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 61-68.  
YAN Wensheng, ZHANG Liangliang, LI Huanyang, et al. Effects of chemical modification on physicochemical properties, structure and emulsifying stability of *Forsythia suspensa* insoluble dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 61-68.
- [31] 苏靖程, 李晗, 范方宇. 无籽刺梨渣膳食纤维的羧甲基化改性及性质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 34-42.  
SU Jingcheng, LI Han, FAN Fangyu. Carboxymethylation modification and properties of dietary fiber from *Rosa sterilis* pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 34-42.
- [32] WANG X J, ZHANG Y Y, LI Y B, et al. Insoluble dietary fibre from okara (soybean residue) modified by yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 134: 110252.
- [33] LIAO A M, ZHANG J, YANG Z L, et al. Structural, physicochemical, and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber modified with probiotic fermentation[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 803440.
- [34] 关玉婷, 张瑞, 柴燃, 等. 发酵改性黑米渣膳食纤维工艺及功能特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 10-16, 23.  
GUAN Yuting, ZHANG Rui, CHAI Ran, et al. Study on fermentation and modification process of dietary fiber from black rice residues and its functional characteristics[J]. China Condiment, 2023, 48(5): 10-16, 23.
- [35] 黎杰, 陶惟一, 李霜. 耐辐射奇球菌全局调控蛋白 IrrE 作为抗逆元件的机制及应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 500-510.  
LI Jie, TAO Weiyi, LI Shuang. Mechanism and applications of the global regulator IrrE from *Deinococcus radiodurans* using as tolerance elements[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(5): 500-510.
- [36] 王诚刚, 郭芸, 赵雯. 乳酸菌发酵豆粕工艺参数优化及其对豆粕营养成分的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(3): 102-105.  
WANG Chenggang, GUO Yun, ZHAO Wen. Optimization of process parameters of soybean meal fermented by lactic acid bacteria and its effect on nutritional components of soybean meal[J]. Feed Research, 2023, 46(3): 102-105.
- [37] 王欣宇. 特异性产纤维素酶东北红豆杉内生真菌的筛选及初步应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.  
WANG Xinyu. Screening of endophytic fungi of *Taxus cuspidata* S. et Z. for specific production of cellulase and its preliminary application[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.
- [38] 王虎玄, 柯西娜, 王聪, 等. 苹果酵素的制备及其抗氧化功能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(3): 37-46.  
WANG Huxuan, KE Xina, WANG Cong, et al. Study on preparation and antioxidant function of apple enzyme[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2023, 41(3): 37-46.
- [39] 潘梦颖, 张才, 李元晓, 等. 植物多糖改善肠道健康的作用机制及甘草多糖在生产上的应用[J]. 饲料工业, 2023, 44(5): 40-43.  
PAN Mengying, ZHANG Cai, LI Yuanxiao, et al. Mechanism of plant polysaccharide on promoting intestinal health and application of *Glycyrrhiza* polysaccharide in production[J]. Feed Industry, 2023, 44(5): 40-43.
- [40] 吴文亮, 刘仲华, 林勇, 等. 陈年六堡茶对高脂血症小鼠的调脂护肝作用研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(4): 430-438.  
WU Wenliang, LIU Zhonghua, LIN Yong, et al. Alleviative effects of aged Liupao tea on lipid metabolism and liver injury in hyperlipidemic mice[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(4): 430-438.
- [41] 韩婕妤. 奇亚籽膳食纤维酶法改性及体外消化性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.  
HAN Jieyu. Enzymatic modification and *in vitro* digestion properties of dietary fiber from Chia seed [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [42] WANG C F, SONG R Z, WEI S Q, et al. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109220.
- [43] 白冉冉, 宋明发, 章乾, 等. 复合酶法改性姜渣不溶性膳食纤维及抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 87-92.  
BAI Ranran, SONG Mingfa, ZHANG Qian, et al. Study on modification of insoluble dietary fiber from ginger residue by complex enzyme method and its antioxidant activity[J]. China Condiment, 2023, 48(1): 87-92.
- [44] 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 Weiwei, QU Junya, ZHOU Caiqiong. 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.
- [45] ZHOU D P, LIU J, LIU S W, et al. Characterisation of alkaline and enzymatic modified insoluble dietary fibre from *Undaria pinnatifida*[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(12): 3533-3541.
- [46] YU Y, ZHAO J J, LIU J H, et al. Improving the function of pickle insoluble dietary fiber by coupling enzymatic hydrolysis with HHP treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(12): 4634-4643.
- [47] TIAN M L, PAK S, MA C, et al. Chemical features and biological functions of water-insoluble dietary fiber in plant-based foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(4): 928-942.
- [48] LEE K Y, PARK K H, LEE H G. Effect of modified dietary fiber extracted from wholegrain wheat on the physicochemical and cake properties[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(2): 477-482.
- [49] KUMARI T, DAS A B, DEKA S C. Effect of extrusion and enzyme modification on functional and structural properties of pea peel (*Pisum sativum* L.) insoluble dietary fibre and its effect on yogurt rheology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(10): 6668-6677.
- [50] 李玉栋, 李华, 刘鑫慧, 等. 麦麸不溶性膳食纤维对面团及面条品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 43-50.  
LI Yudong, LI Hua, LIU Xinhui, et al. The effect of wheat bran insoluble dietary fiber on the quality of dough and noodles [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 43-50.
- [51] 尹立晨. 豆渣膳食纤维的改性及其在酸奶冰淇淋中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.  
YIN Lichen. Modification of soybean residue dietary fiber and its application in yogurt ice cream[D] Wuxi: Jiangnan University, 2022.