

# 麦麸膳食纤维的提取及在食品中的应用

李晓宁, 汪丽萍\*

(国家粮食和物资储备局科学研究院粮油加工研究所, 北京 102209)

**摘 要:** 膳食纤维作为“第七大营养素”对维护人体健康起着必不可少的作用, 麦麸作为丰富且理想的谷物膳食纤维来源, 已受到普遍关注与广泛研究利用。本文综述了麦麸膳食纤维的提取方法及食品应用研究进展, 并对未来的研究与发展方向进行了展望, 旨在为麦麸膳食纤维有针对性地开发利用提供借鉴与帮助。

**关键词:** 麦麸; 膳食纤维; 提取; 应用

## Extraction of wheat bran dietary fiber and its application in food

LI Xiao-Ning, WANG Li-Ping\*

(Institute of Cereal & Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102209, China)

**ABSTRACT:** As the “seventh nutrient”, dietary fiber plays an essential role in the maintenance of human health. Wheat bran, as a rich and ideal source of dietary fiber from grain, has attracted widespread attention and been widely studied and utilized. This paper summarized the research progress on the extraction of wheat bran dietary fiber and its application in food, and prospected the direction of research and development in future, in order to provide reference and help for the targeted development and utilization of wheat bran dietary fiber.

**KEY WORDS:** wheat bran; dietary fiber; extraction; application

## 1 引 言

根据食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)的定义, 膳食纤维是指含有 10 个或 10 个以上单体单元, 不能在人体小肠中被内源酶水解的碳水化合物聚合物, 也有学者认为膳食纤维应包含 3~9 聚合度的碳水化合物<sup>[1]</sup>, 包括细胞壁多糖、低聚糖、木质素等以及与之键合的相关物质。根据水溶性的不同, 膳食纤维分为水溶性膳食纤维和水不溶性膳食纤维 2 大类, 二者在结构和功效上具有一定的差异。已有的研究表明, 膳食纤维具有预防和缓解糖尿病、结肠癌、中风、高血压、肥胖、便秘等多种重要生

理功能<sup>[2]</sup>, 被称为“第七大营养素”。膳食纤维在谷物、豆类、水果、蔬菜等植物性食品中广泛分布, 含量和组成受植物种类、所使用的植物部位、储存条件、成熟度和加工操作影响而各不相同<sup>[3]</sup>。

麦麸是最丰富的谷物膳食纤维来源之一, 作为小麦制粉的加工副产物, 世界年产量超 1.5 亿吨, 具有极大的资源优势, 但目前多以畜牧饲料形式消耗<sup>[4]</sup>, 造成极大的浪费。近 64%的麦麸细胞壁由阿拉伯木聚糖构成, 因此麦麸膳食纤维中含有较高含量的阿拉伯木聚糖(70%), 这一成分被证明能够有效降低 II 型糖尿病的患病风险; 阿魏酸作为麦麸中的主要酚酸(0.5%~0.7%), 具有良好的抗氧化

**基金项目:** “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0401002)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX1904)

**Fund:** Support by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0401002), and the Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund (ZX1904)

**\*通讯作者:** 汪丽萍, 研究员, 主要研究方向为粮食加工与安全。E-mail: wlp@ags.ac.cn

**\*Corresponding author:** WANG Li-Ping, Professor, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102209, China. E-mail: wlp@ags.ac.cn

性能,其大部分通过酯键与阿拉伯木聚糖侧链的阿拉伯糖残基连接<sup>[5]</sup>,对于阿拉伯木聚糖与蛋白质的交互起到关键作用。

随着人们对膳食纤维营养健康功效认知的深入和需求的提升,以及粮食加工副产物高值化利用呼声的高涨,国内外已广泛开展对麦麸膳食纤维的研究与利用,包括麦麸膳食纤维的提取方法<sup>[6]</sup>、生理效能<sup>[7]</sup>、改性技术<sup>[8]</sup>、食品应用<sup>[9]</sup>与作用机制<sup>[10]</sup>等。本文针对麦麸膳食纤维提取方法及其食品应用展开综述,旨在为后续麦麸膳食纤维提取方法的优化改进及其在食品领域中的应用拓展等提供借鉴与帮助。

## 2 麦麸膳食纤维的提取

获得组分相对纯粹的膳食纤维是拓展其应用领域、实现其功效最大化的前提条件,目前麦麸膳食纤维的提取方法主要集中在化学法、酶法、酶-化学法和机械辅助法等。

### 2.1 化学法

化学法是最常用的麦麸膳食纤维提取方法,一般是碱溶解去除麦麸中的蛋白质、皂化反应去除脂肪,酸水解去除麦麸中的淀粉。贾元飞等<sup>[11]</sup>采用酸碱结合法对麦麸水不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)进行提取,最佳工艺下提取率为 58.87%。碱法也是最常用的阿拉伯木聚糖提取方法,通过氢氧离子来破坏存在于麦麸细胞壁的氢键和共价键使得阿拉伯木聚糖得以释放出来<sup>[12,13]</sup>。杨莎等<sup>[14]</sup>分别使用 NaOH 和 Ba(OH)<sub>2</sub> 提取获得碱提阿拉伯木聚糖(alkaline extracted arabinoxylans, AEAXs),发现以 Ba(OH)<sub>2</sub> 提取获得的 AEAXs 纯度更高,可达到 87.38%,且侧链阿拉伯糖基取代度和相对分子质量相较 NaOH 法也较大。

化学法成本低廉、操作简单,但该法提取的麦麸膳食纤维颜色较深,化学残留也直接影响到其气味与口感。酸碱处理后的反复冲洗也使得麦麸膳食纤维持水性、溶胀性降低<sup>[14]</sup>。此外,化学法产生的废水对环境造成了潜在威胁,提高了后续处理废水的成本。

### 2.2 酶法

酶法提取麦麸膳食纤维通常以淀粉酶( $\alpha$ -淀粉酶)去除蛋白质网络中的淀粉,同时加入一定比例的糖化酶辅助淀粉完全降解,通过蛋白酶降解去除麦麸中蛋白质<sup>[15]</sup>,最为常用的是碱性蛋白酶。张媛媛等<sup>[16]</sup>采取双酶提取法制备小麦麸皮膳食纤维,最佳提取条件为 $\alpha$ -淀粉酶添加量为 0.6%,酶解 pH 为 6,酶解温度为 70 °C;碱性蛋白酶添加量为 0.3%,酶解 pH 为 9,酶解温度为 55 °C,麦麸皮膳食纤维提取率为 71.94%。向琴等<sup>[17]</sup>发现以酶法去除麦麸中的淀粉和蛋白质后,麦麸膳食纤维的持水力、持油力、膨胀率相较于原料麦麸分别提高 121.40%、251.54%和 135.87%。

酶法条件温和、安全无毒,该法制得的麦麸膳食纤维口感好,纤维天然结构破坏性低,因此功能特性得到较好保留。但是酶法利用和推广还存在一定的瓶颈问题,如高效特异性酶制剂的开发及酶制剂成本较高等。

### 2.3 酶-化学法

酶-化学法是基于上述化学法和酶法的水解原理以组合方式去除麦麸中非膳食纤维组分,分为酸-蛋白酶法和淀粉酶-碱法。在提升膳食纤维纯度及其 DPPH 自由基清除能力方面酶-化学法高于化学法,低于酶法<sup>[18]</sup>。李鹏飞等<sup>[19]</sup>研究比较发现淀粉酶-碱法得率(63.48%)高于酸-蛋白酶法(52.43%),且淀粉酶-碱法所得产品片小、细腻、无异味、色泽较浅。目前对于酶-化学法工艺优化研究也多围绕淀粉酶-碱法组合模式。姜小苓等<sup>[20]</sup>以混合酶( $\alpha$ -淀粉酶:糖化酶=1:1, *m:m*)-氢氧化钠法对麦麸膳食纤维进行提取,最佳工艺条件:酶添加量 1.5%,酶解时间 45 min,碱添加量 4%,碱解时间 35 min,膳食纤维得率达 87.84%。

酶-化学法通过组合形式部分改善了化学法试剂残留严重、酶法制剂成本较高等问题,同时使麦麸膳食纤维的纯度和得率以及产品功能性质都得到了一定保障。

### 2.4 机械辅助法

机械辅助法是提取工艺中通过机械设备(亚临界、超声波等)作用降低各组分之间的紧密结合,在提取过程中增强了有效成分的溶出效果,以实现较高得率,该类方法主要是用于麦麸中可溶性膳食纤维的提取。Yan 等<sup>[6]</sup>以柠檬酸溶液作为提取溶剂分别使用亚临界、亚临界+超声波组合对麦麸水溶性膳食纤维进行提取,后者具有更高的得率(46.30%),更低的平均分子量(65.2 kDa)以及更为松散且多孔的结构,同时具有更强的抗氧化性及 $\alpha$ -淀粉酶抑制活性。范玲等<sup>[21]</sup>通过超声波辅助提取麦麸中酚基木聚糖,最佳工艺条件:超声功率 300 W,超声时间 30 min;碱液质量分数 2%,碱提时间 2 h,碱提温度 55 °C,在此条件下酚基木聚糖得率为 38.73%,水溶性酚基木聚糖得率为 29.05%。

机械辅助法具有快速、高效、得率高等优点,但都需要额外引入设备,对于实际生产中的经济成本是一个挑战。

## 3 麦麸膳食纤维在食品中的应用

食用麦麸膳食纤维有利于改善 II 型糖尿病,降低冠心病等慢性疾病的发病风险,减少结肠癌的发生几率,具备的水合性(持水性和溶胀性)、持油性、黏性和凝胶形成能力以及抗氧化活性和自由基清除等理化特性<sup>[22]</sup>使其在不同食品体系中表现出不同的加工特性。因此,麦麸膳食纤维已在面制品、肉制品、饮品等多类食品中得到广泛的应用。

### 3.1 麦麸膳食纤维在烘焙面制品中的应用

烘焙面制品因其加工过程中发生美拉德反应而具有独特的风味和色泽, 深受消费者的喜爱。人们对于“高纤低脂”饮食模式的青睐促使烘焙面制品原料迎来了新的成员——麦麸膳食纤维。利用麦麸膳食纤维的高持水性能能够改善烘焙面制品的质构, 使其口感更为柔软疏松, 提高产品出率, 以及提高新鲜度、延缓老化等。目前麦麸膳食纤维已应用于面包、蛋糕、饼干、曲奇、桃酥等多种烘焙面制品之中。

Rezaci 等<sup>[23]</sup>使用面包酵母对中等粒径麦麸(200~300  $\mu\text{m}$ )进行发酵处理, 去除了大部分植酸并提高了可溶性膳食纤维的含量, 将此发酵麦麸以 15%的比例添加于塔夫顿面包中, 滋味、风味和整体接受度均高于空白, 并且可以有效地保持面包的新鲜度, 延长面包的货架期。Koegelenberg 等<sup>[24]</sup>将麦麸阿拉伯木聚糖(A/X 为 0.6~0.7)以 0.8%的最优剂量替代 2.5%的面粉, 所得面包的重量、体积、高度和硬度与标准白面包无异, 但颜色略深。Arif 等<sup>[25]</sup>研究表明膳食纤维中的水溶性组分(水溶性戊聚糖)能提高面包品质, 更有利于高纤面包的制作。

Lebesi 等<sup>[26]</sup>将小麦膳食纤维应用于纸杯蛋糕的制作之中, 发现能够增大蛋糕的体积、降低蛋糕的硬度, 延缓储藏过程中的水分流失, 延长货架期。Struck 等<sup>[27]</sup>使用小麦膳食纤维和莱菔迪甙 A(RebA, 甜味替代剂)替代蔗糖来制作玛芬蛋糕, 随着膳食纤维添加量的增大, 蛋糕面糊的黏度增大, 蛋糕体积减小、硬度增大。Erinc 等<sup>[28]</sup>以不同粒径的麦麸膳食纤维凝胶作为脂肪替代品加入到饼干中, 发现较大粒径的膳食纤维凝胶在降低脂肪含量的同时更有利于饼干品质(硬度、酥脆性、摊铺率)保持。Li 等<sup>[29]</sup>研究指出将从预发酵麦麸中提取到的可溶性膳食纤维以 0.5%比例添加到曲奇中可以获得酥脆的口感以及出色的感官特性。任志远等<sup>[30]</sup>还将麦麸膳食纤维添加到了中式点心桃酥中, 通过正交实验确定最佳配方, 制作的麦麸膳食纤维桃酥组织状态均匀一致、酥松爽口、口味油润清香, 具有独特的麦麸香气。

### 3.2 麦麸膳食纤维在蒸煮面制品中的应用

馒头和面条是我国广受欢迎的传统主食, 据统计加工生产这 2 种面制品的小麦粉占我国小麦粉消费量近 70%<sup>[31]</sup>。庞大的消费群体为利用馒头和面条进行膳食纤维补充提供了先决条件。基于膳食纤维的高持水性能, 适宜的添加能改善馒头和面条的品质, 例如增大馒头比容、降低馒头硬度, 提高面条吸水率、降低面条蒸煮损失率等。

马瑞杰等<sup>[32]</sup>将超声-酶法联用提取到的麦麸水溶性阿拉伯木聚糖(water extracted arabinoxylan, WEAX)适量添加于小麦粉中, 可降低馒头的硬度和黏性, 改善其质构特性, 提高馒头质量, 但会降低馒头的白度, 加深馒头的黄色程

度。Wang 等<sup>[33]</sup>研究发现低分子量高分支度的麦麸 WEAX 能够较大幅度降低面筋的热聚合度和热聚合速率, 这种 WEAX 对面筋聚合的抑制作用促进了馒头体积的增大以及质地的软化。王晓曦等<sup>[34]</sup>研究指出当麦麸酚基木聚糖添加量为 0.5%时, 发酵面团弹性模量最大, 半结合水含量最高, 馒头硬度较低, 回复性较好, 对馒头的品质改善效果最好。高分子量酚基木聚糖对发酵面团及馒头品质改善的效果优于低分子量的酚基木聚糖。

陶春生等<sup>[35]</sup>将挤压改性麦麸膳食纤维添加到面条中, 发现面条的硬度、咀嚼性、胶黏性、吸水率与添加量呈显著正相关, 而蒸煮损失率与之呈显著负相关。麦麸膳食纤维的添加会使面条外观质量下降, 但却能改善其口感及风味, 使整体感官有所提升。Fan 等<sup>[36]</sup>发现麦麸阿拉伯木聚糖会使面片颜色加深。在 0.25%~1.0%添加范围内能够改善面条蒸煮特性(增大吸水率、降低蒸煮损失率)。除此还发现较高分子量的阿拉伯木聚糖更有利于面条的品质。周玉瑾等<sup>[37]</sup>以酶-化学法制备麦麸水溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和水不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)并将其分别应用于挂面制作之中, 在 3%的最佳添加量下挂面品质明显提升, 质构特性得到改善, 微观结构也更加均匀。由于较多水分被膳食纤维束缚, 使得挂面更利于贮藏。

不可回避的是在添加麦麸膳食纤维后, 无论是烘焙面制品还是蒸煮面制品, 都存在颜色加深的问题, 甚者还会影响对面制品的色泽以及整体接受度。为了解决这一问题, 孙颖等<sup>[38]</sup>使用碱性  $\text{H}_2\text{O}_2$  对麦麸膳食纤维进行脱色处理, 最佳脱色条件下白度达到 85 以上, 与此同时麦麸膳食纤维的水合性质和持油性都得到改善。Shagrawi 等<sup>[39]</sup>还发现使用碱性  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理的麦麸膳食纤维不光在理化性质上得到提升, 在降血糖和降血脂水平上也优于未处理组。此外, 当麦麸膳食纤维中不溶性成分占比极大时会导致面制品体积缩小、硬度增大, 这源于膳食纤维对面筋网络的破坏。Zhang 等<sup>[40]</sup>通过半固态发酵和酶解等麦麸改性处理手段, 可提高其可溶性组分的含量, 进而抑制麦麸对于面筋网络的破坏作用。其中具有中等相对分子质量、较高取代度、较大二取代度比例的可溶性膳食纤维与面团网络的相容度更好, 更有利于面团品质的提高<sup>[29]</sup>。

### 3.3 麦麸膳食纤维在肉制品中的应用

肉制品中添加麦麸膳食纤维能够改善其营养结构不均衡的问题, 同时也可以提高烹饪得率从而获得经济效益<sup>[41]</sup>。依靠能够避免脱水收缩、改变黏度的持水性以及维持脂肪稳定的持油性<sup>[42]</sup>, 麦麸膳食纤维作为结构改良剂、脂肪替代品等在多种肉类(猪肉、鱼肉、鸡肉、牛肉)制品中得到了应用开发。

肌肉肌原纤维蛋白质热诱导凝胶是肉制品加工中最

重要的特性。刘英丽等<sup>[43]</sup>通过微观结构的观察指出添加粒径较小的麦麸膳食纤维填充于交联的猪肉肌原纤维蛋白凝胶网络中,能形成更为致密、均匀的网状结构,使凝胶具有较强的硬度和较好的保水性、粘聚性。Choe 等<sup>[44]</sup>将猪皮与麦麸膳食纤维的混合物作为法兰克福香肠的脂肪替代品添加到猪肉糜中,所制作的香肠在色泽、风味、嫩度、多汁性以及整体的接受度上与传统法兰克福香肠无异,但脂肪含量、热量以及烹饪损失率明显降低。Raúl 等<sup>[45]</sup>认为比夸拉鱼肉饼在加入麦麸后硬度的下降源于麦麸所具备吸水能力,而粘结性的下降则是由于麦麸削弱了肌原蛋白与其他化学物质之间的相互作用。Choe 等<sup>[46]</sup>考察了以鸡皮、麦麸膳食纤维和水混合物作为乳化型鸡肉香肠脂肪替代品的适宜性,发现随着添加量增大,香肠的脂肪含量下降。蛋白含量、乳化稳定性和 pH 都没有显著变化。添加量不超过 15% 时对香肠品质特性无不良影响。Carvalho 等<sup>[47]</sup>以水化麦麸膳食纤维部分替代牛肉饼中的肉类和脂肪,降低了牛肉饼中脂质、卡路里含量,强化了牛肉饼中不溶性膳食纤维。与空白组相比食用后的饱腹感并没有降低。

### 3.4 麦麸膳食纤维在饮品中的应用

随着消费者饮食观念及消费观念的转变,饮料行业从过去碳酸饮料一家独大的局面转而进入了功能性饮料迅速崛起的新阶段,膳食纤维发酵饮品的开发是当下热点。麦麸膳食纤维的适宜添加不仅不会破坏饮品的感官品质,反而强化了其生理功效。

目前针对麦麸膳食纤维非发酵饮料的报道还比较有限,更多的是关于发酵饮料。Pasqualone 等<sup>[48]</sup>以麦麸和玉米粉的水悬浮液为原料经天然发酵制得罗马尼亚传统饮料 *borș*, 以 4 °C 进行发酵时不愉快的辛辣味和山羊奶酪气味减弱,同时伴随酚类物质水平和抗氧化活性的提高。Bultosa 等<sup>[49]</sup>研究指出膳食纤维可作为益生元促进益生菌的生长与生存。因此 Mantzourani 等<sup>[50,51]</sup>将益生菌(副干酪乳杆菌 K5)固定于去木质素的麦麸上,分别进行了石榴发酵饮料和樱桃发酵饮料的研制,研究发现去木质素麦麸能够有效地保护益生菌的生存能力,总酚含量有所增加,消费者的整体接受度高于未发酵果汁。酸奶是世界范围内公认的最营养和健康的食品之一,酸奶比牛奶具有更高的蛋白消化率,同时能为人体提供多种益生菌。Aportela 等<sup>[52]</sup>研究发现在发酵酸奶时加入麦麸膳食纤维,能够提高酸奶的稠度同时降低其脱水收缩性,这得益于麦麸膳食纤维所具有的水结合能力、凝胶形成能力等<sup>[53]</sup>。

### 3.5 麦麸膳食纤维在其他食品中的应用

除了在上述食品应用外,近年来麦麸膳食纤维的食品应用研究也不断扩展。李新明等<sup>[54]</sup>利用麦麸水溶性膳食纤维的抗氧化活性,将其作为花生油抗氧化剂。Akalin 等<sup>[55]</sup>将麦麸膳食纤维应用于益生菌冰激凌中,发现麦麸膳

食纤维保持冰激凌感官特性和益生菌活力的同时,还有改善流变学和结构特性的潜力。李丹<sup>[56]</sup>以挤压膨化麦麸为原料配制了 3 种适合不同人群食用的代餐粉(正常人群、肥胖人群、糖尿病人)。烫葆莎等<sup>[57]</sup>以食用菌秀珍菇发酵麦麸膳食纤维复合产物为主要原料,采用全粉末直接压片技术制备的咀嚼片表面光滑、色泽均一、硬度适中,同时还具有较高的脂质过氧化抑制作用和羟自由基清除能力。

## 4 展 望

当前麦麸膳食纤维的开发及利用已成为小麦加工副产物麦麸高值化利用的一个重要方向,也是功能性食品研发的重要方向。麦麸膳食纤维提取方法的研究是其食品化利用的重要基础,目前已从常用的化学法向生物法过渡。麦麸膳食纤维食品化应用的研究也已遍及面制品、肉制品、饮品等多个领域。尽管麦麸膳食纤维提取与应用研究已经日趋多样化、成熟化,但依然面临着一系列亟待解决的问题:(1)生物提取法因其条件温和、安全无毒的特点,将成为未来主流的膳食纤维提取方法,但成本较高、现有酶制剂特异性不强等问题也在一定程度限制了其发展。因此,急需开发适用于麦麸膳食纤维提取的高效特异性酶制剂;(2)麦麸膳食纤维的提取与应用之间的衔接关系紧密性不强,未来可通过构建麦麸膳食纤维提取方法、组分与组成、理化加工特性、食品感官品质四者之间的对应关系,筛选出满足不同食品体系的麦麸膳食纤维提取方法;(3)关于麦麸膳食纤维在食品中的应用研究多集中于在不影响食品感官体验的基础上寻求最大的添加量,但对于麦麸膳食纤维或麦麸膳食纤维-酚酸复合物与食品体系中其他组分(蛋白、淀粉等)相互作用的机制研究尚不完善,加大对作用机理的探究,在分子层面干预和调控麦麸膳食纤维对于食品体系造成的影响,有利于改善食品品质,最大限度的满足人们对健康美味食品的需求。

国民日趋精细化的饮食模式导致多种慢性疾病发病率呈井喷式增长,膳食纤维作为能够有效控制该类疾病的重要营养成分已被大众逐渐熟知,膳食纤维产品在注重健康饮食的今天势必也将受到越来越多人们的青睐,需求将推动膳食纤维食品的发展。麦麸膳食纤维原料资源充足且价格低廉,为广泛应用于食品之中奠定了资源基础,此外出色的水合、持油、抗氧化等加工性能使得麦麸膳食纤维作为功能性食品添加剂具备于更多食品体系应用开发的潜力,未来伴随科研工作者和食品企业的不断创新,市场规范和产品标准的不断完善,将有更多的麦麸膳食纤维产品走进我们的生活。

## 参考文献

- [1] De MEW, Giuntini EB, Dan MCT, *et al.* Codex dietary fibre definition-Justification for inclusion of carbohydrates from 3 to 9 degrees

- of polymerization [J]. Food Chem, 2013, 140(3): 581–585.
- [2] Kendall CW, Esfahani A, Jenkins DJ. The link between dietary fibre and human health [J]. Food Hydroc, 2010, 24(1): 42–48.
- [3] Mudgil D, Barak S. Classification, technological properties, and sustainable sources [J]. Diet Fiber Prop Recov Appl, 2019, 7: 27–58.
- [4] Prückler M, Siebenhandl ES, Apprich S, *et al.* Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization [J]. LWT-Food Sci Technol, 2014, 56(2): 211–221.
- [5] Yuan XP, Wang J, Yao HY. Antioxidant activity of feruloylated oligosaccharides from wheat bran [J]. Food Chem, 2005, 90(4): 759–764.
- [6] Yan JK, Wu LX, Cai WD, *et al.* Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran [J]. Food Chem, 2019, 298(15): 124987.
- [7] Alberts DS, Einspahr J, Ritenbaugh C, *et al.* The effect of wheat bran fiber and calcium supplementation on rectal mucosal proliferation rates in patients with resected adenomatous colorectal polyps [J]. Cancer Epidem Biomar, 1997, 6(3): 161–169.
- [8] Aktas AE, Masatcioglu MT, Köksel H. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran [J]. J Cere Sci, 2020, 93(5): 102941.
- [9] Chen JS, Fei MJ, Shi CL, *et al.* Effect of particle size and addition level of wheat bran on quality of dry white Chinese noodles [J]. J Cere Sci, 2011, 53(2): 217–224.
- [10] Han W, Ma S, Li L, *et al.* Gluten aggregation behavior in gluten and gluten-starch doughs after wheat bran dietary fiber addition [J]. LWT, 2019, 106(6): 1–6.
- [11] 贾元飞, 石荣乐, 李艳群, 等. 麦麸中水不溶性膳食纤维提取工艺的研究[J]. 现代盐化工, 2018, 45(2): 89–90.
- Jia YF, Shi RL, Li YQ, *et al.* Study on extraction technology of water-insoluble dietary fiber from wheat bran [J]. Mod Salt Chem Ind, 2018, 45(2): 89–90.
- [12] Anderson C, Simsek S. A novel combination of methods for the extraction and purification of arabinoxylan from byproducts of the cereal industry [J]. J Food Meas Charact, 2019, (13): 1049–1057.
- [13] 邵佩兰, 李雯霞, 徐明. 不同提取方法对麦麸膳食纤维特性的影响[J]. 食品科技, 2003, (11): 98–100.
- Shao PL, Li WX, Xu M. Different extracting method influences on the property of dietary fiber from wheat bran [J]. Food Sci Technol, 2003, (11): 98–100.
- [14] 杨莎, 郭晓娜, 朱科学, 等. 碱提方法对小麦麸皮阿拉伯木聚糖结构及面团特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 8–13, 33.
- Yang S, Guo XN, Zhu KX, *et al.* Effect of arabinoxylan extracted by different methods on the dough thermo-mechanical and rheological properties [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2017, 32(11): 8–13, 33.
- [15] 李慧静, 贾英民, 王林, 等. 响应面法优化酶法提取麦麸膳食纤维工艺[J]. 农业工程技术, 2007, (7): 27–31.
- Li HJ, Jia YM, Wang L, *et al.* Enzyme technology optimization of extracting dietary fiber from wheat bran by response surface analysis [J]. Agric Eng Technol, 2007, (7): 27–31.
- [16] 张媛媛, 宣丽, 吕美, 等. 双酶法提取小麦麸皮膳食纤维的工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(4): 36–40.
- Zhang YY, Xuan L, Lv M, *et al.* Study on technology of extracting the dietary fiber from wheat bran by the double enzymatic method [J]. Cere Food Ind, 2019, 26(4): 36–40.
- [17] 向琴, 王昊英, 孙媛, 等. 采用生物分离技术提升麦麸膳食纤维的功能特性[J]. 中国酿造, 2014, 33(11): 81–84.
- Xiang Q, Wang HY, Sun Y, *et al.* Improvement of wheat bran dietary fiber functional characteristics by biological separation technology [J]. China Brew, 2014, 33(11): 81–84.
- [18] 张国真. 麦麸膳食纤维、低聚木糖制备及物化特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- Zhang GZ. Characterization of dietary fiber and XOS extraction from wheat bran [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
- [19] 李鹏飞, 陆红佳, 任志远. 不同方法提取麦麸膳食纤维的比较研究[J]. 现代农业科学, 2009, 16(6): 7–9.
- Li PF, Lu HJ, Ren ZY. Comparative study on different methods of wheat bran dietary fiber yield [J]. Mod Agric Sci, 2009, 16(6): 7–9.
- [20] 姜小琴, 李小军, 李淦, 等. 响应面法优化麦麸膳食纤维提取条件[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 158–162.
- Jing XL, Li XJ, Li G, *et al.* Response surface methodology for extraction optimization of dietary fiber from wheat bran [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(6): 158–162.
- [21] 范玲, 马森, 王晓曦, 等. 超声波辅助提取小麦麸皮酚基木聚糖的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014, (11): 24–28.
- Fan L, Ma S, Wang XX, *et al.* Study on ultrasound-assisted of phenolic xylans from wheat bran [J]. Cere Feed Ind, 2014, (11): 24–28.
- [22] Elleuch M, Bedigian D, Roiseux O, *et al.* Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review [J]. Food Chem, 2011, 124(2): 411–421.
- [23] Rezaei S, Najafi MA, Haddadi T. Effect of fermentation process, wheat bran size and replacement level on some characteristics of wheat bran, dough, and high-fiber Tafton bread [J]. J Cereal Sci, 2019, 85: 56–61.
- [24] Koegelenberg D, Chimphango AF. Effects of wheat-bran arabinoxylan as partial flour replacer on bread properties [J]. Food Chem, 2017, 221: 1606–1613.
- [25] Arif S, Ahmed M, Chaudhry Q, *et al.* Effects of water extractable and unextractable pentosans on dough and bread properties of hard wheat cultivars [J]. LWT, 2018, 97: 736–742.
- [26] Lebesi DM, Tzia C. Effect of the addition of different dietary fiber and edible cereal bran sources on the baking and sensory characteristics of cupcakes [J]. Food Bioproc Tech, 2011, 4(5): 710–722.
- [27] Struck S, Gundel L, Zahn S, *et al.* Fiber enriched reduced sugar muffins made from iso-viscous batters [J]. LWT, 2016, 65: 32–38.
- [28] Erinc H, Mert B, Tekin A. Different sized wheat bran fibers as fat mimetic in biscuits: its effects on dough rheology and biscuit quality [J]. Int J Food Sci Technol, 2018, 55(10): 3960–3970.
- [29] Li Q, Liu R, Wu T, *et al.* Soluble dietary fiber fractions in wheat bran and their interactions with wheat gluten have impacts on dough properties [J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(46): 8735–8744.
- [30] 任志远, 李鹏飞. 麦麸膳食纤维在桃酥中的应用研究[J]. 现代农业科技, 2010, 11: 338–340.
- Ren ZY, Li PF. Study on processing technology of dietary fiber in walnut cake [J]. Mod Agric Sci Technol, 2010, 11: 338–340.
- [31] 宋归华, 刘锐, 王旭琳, 等. 小麦及制品的营养特性与营养化途径[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 180–187.
- Song GH, Liu R, Wang XL, *et al.* Nutrition characteristics and nutrition

- fortification of wheat grains and products [J]. J Chin Cere Oil Ass, 2020, 35(7): 180–187.
- [32] 马瑞杰, 温纪平, 徐启恩. 阿拉伯木聚糖(AX)添加量对馒头品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 47–51.
- Ma RJ, Wen JP, Xu QE. Effect of addition of arabinoxylan on the quality of steamed bread [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2018, 39(3): 47–51.
- [33] Wang P, Hou C, Zhao X, *et al.* Molecular characterization of water-extractable arabinoxylan from wheat bran and its effect on the heat-induced polymerization of gluten and steamed bread quality [J]. Food Hydroc, 2019, 87: 570–581.
- [34] 王晓曦, 范玲, 马森, 等. 麦麸酚基木聚糖对发酵面团特性和馒头品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 302–307.
- Wang XX, Fan L, Ma S, *et al.* Effects of phenolic xylans from wheat bran on fermented dough properties and qualities of steamed bread [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31(17): 302–307.
- [35] 陶春生, 陈存社, 王克俭. 挤压改性麦麸膳食纤维对面条品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(9): 132–136.
- Tao CS, Chen CS, Wang KJ. Effects of extrusion modification of wheat bran dietary fiber on quality of noodle [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(9): 132–136.
- [36] Fan L, Ma S, Wang X, *et al.* Improvement of Chinese noodle quality by supplementation with arabinoxylans from wheat bran [J]. Int J Food Sci Technol, 2016, 51(3): 602–608.
- [37] 周玉瑾, 李梦琴, 李超然, 等. 麦麸水溶性膳食纤维和水不溶性膳食纤维对面条性状指标的影响及其扫描电镜的观察[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 128–133.
- Zhou YJ, Li MQ, Li CR, *et al.* Effects on noodle quality by the SDF or IDF of wheat bran and SEM graphs [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(6): 128–133.
- [38] 孙颖, 朱科学, 钱海峰, 等. 小麦麸膳食纤维脱色工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2008, (6): 242–244, 247.
- Sun Y, Zhu KX, Qian HF, *et al.* Study on bleaching technology of wheat bran dietary fiber [J]. Sci Technol Food Ind, 2008, (6): 242–244, 247.
- [39] Al-Shagrawi RA, Al-Ojayan MO, Sadek MA, *et al.* Effects of alkaline, hydrogen peroxide-treated fibres on nutrient digestibility, blood sugar and lipid profile in rats [J]. Food Chem, 1999, 65(2): 213–218.
- [40] Zhang HJ, Zhang XS, Cao XR, *et al.* Semi-solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization [J]. LWT, 2018, 98(12): 306–313.
- [41] Talukder S. Effect of dietary fiber on properties and acceptance of meat products: A review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2015, 55(7): 1005–1011.
- [42] Mehta N, Ahlawat SS, Sharma DP, *et al.* Novel trends in development of dietary fiber rich meat products - A critical review [J]. Int J Food Sci Technol, 2015, 52(2): 633–647.
- [43] 刘英丽, 谢良需, 丁立, 等. 小麦麸膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶功能特性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(19): 15–23.
- Liu YL, Xue XL, Ding L, *et al.* Effect of wheat dietary fibers on functional properties of pork myofibrillar protein gels [J]. Food Sci, 2016, 37(19): 15–23.
- [44] Choe JH, Kim HY, Lee JM, *et al.* Quality of frankfurter-type sausages with added pig skin and wheat fiber mixture as fat replacers [J]. Meat Sci, 2013, 93(4): 849–854.
- [45] Raúl LJ, De AIB, Barbosa RC. Manufacture of Biquara (Haemulon Plumierii-Lacepède, 1801) fishburger with addition of wheat bran [J]. J Aquat Food Prod Technol, 2018, 27(5): 544–556.
- [46] Choe J, Kim HY. Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer [J]. Poult Sci, 2019, 98(6): 2662–2669.
- [47] Carvalho LT, Pires MA, Baldin JC, *et al.* Partial replacement of meat and fat with hydrated wheat fiber in beef burgers decreases caloric value without reducing the feeling of satiety after consumption [J]. Meat Sci, 2019, 147: 53–59.
- [48] Pasqualone A, Summo C, Laddomada B, *et al.* Effect of processing variables on the physico-chemical characteristics and aroma of bors, a traditional beverage derived from wheat bran [J]. Food Chem, 2018, 265(11): 242–252.
- [49] Bultosa G. Functional foods: Dietary fibers, prebiotics, probiotics, and synbiotics [J]. Food Sci, 2016, 12(1): 1–5.
- [50] Mantzourani I, Terpou A, Bekatorou A, *et al.* Functional pomegranate beverage production by fermentation with a novel *Synbiotic* L. paracasei biocatalyst [J]. Food Chem, 2020, 38(5): 125658.
- [51] Mantzourani I, Terpou A, Alexopoulos A, *et al.* Production of a potentially synbiotic fermented cornelian cherry (*Cornus mas* L.) beverage using *Lactobacillus paracasei* K5 immobilized on wheat bran [J]. Biocatal Agric Biotechnol, 2019, 17: 347–351.
- [52] Aportela PA, Sosa-Morales ME, Velez-Ruiz JF. Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium [J]. J Text Stud, 2005, 36(3): 333–349.
- [53] Dabija A, Codină GG, Gâtlan AM. Quality assessment of yogurt enriched with different types of fibers [J]. CYTA J Food, 2018, 16(1): 859–867.
- [54] 李新明, 乐国伟, 施用晖. 麦麸膳食纤维的提取和油脂抗氧化的研究[J]. 食品工业, 2006, (3): 3–5.
- Li XM, Le GW, Shi YH. Extraction of soluble fiber from wheat bran and its antioxidating activity to oils [J]. Food Ind, 2006, (3): 3–5.
- [55] Akalin AS, Kesenkas H, Dinkci N, *et al.* Enrichment of probiotic ice cream with different dietary fibers: Structural characteristics and culture viability [J]. J Dairy Sci, 2018, 101(1): 37–46.
- [56] 李丹. 以麦麸为基料的代餐粉制备工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- Li D. Study on preparation technology of meal powder based on wheat bran [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.
- [57] 汤葆莎, 赖谱富, 吴俐, 等. 麦麸膳食纤维咀嚼片配方优化及其体外抗氧化能力[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 171–176.
- Tang BS, Lai PF, Wu L, *et al.* Recipe optimization and *in vitro* antioxidant properties of wheat bran dietary fiber chewable tablets [J]. Food Sci, 2017, 38(24): 171–176.

(责任编辑: 于梦娇)

## 作者简介

李晓宁, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为谷物功能成分与加工技术。

E-mail: lxn@ags.ac.cn

汪丽萍, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮食加工与安全。

E-mail: wlp@ags.ac.cn