

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.011

杨柯伟, 刘芳芳, 郑雁. 麦麸不溶性膳食纤维提取方法及其对面制品品质影响的综述[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 84-90.

YANG K W, LIU F F, ZHENG Y. Review of extraction method of insoluble dietary fiber from wheat bran and its effect on the quality of facial products[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 84-90.

麦麸不溶性膳食纤维提取方法及其对面制品品质影响的综述

杨柯伟¹, 刘芳芳¹, 郑雁²

(1. 北京东孚久恒仪器技术有限公司, 北京 100037;
2. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 麦麸不溶性膳食纤维具有良好的物化特性和生理功能特性, 近些年来国内外学者对麦麸不溶性膳食纤维的关注度逐年提升。简述了麦麸膳食纤维和麦麸不溶性膳食纤维的组成和功能, 介绍了麦麸不溶性膳食纤维的提取方法, 如物理法、化学法、生物法和化学-酶法, 及各种方法的优缺点; 阐述了麦麸不溶性膳食纤维对面制品品质的影响, 如对面条、馒头和面包品质的影响, 旨在为深入研究麦麸不溶性膳食纤维的提取方法和在面制品中的应用提供参考。

关键词: 麦麸不溶性膳食纤维; 提取方法; 面制品; 应用

中图分类号: TS201.4; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)06-0084-07

Review of Extraction Method of Insoluble Dietary Fiber from Wheat Bran and Its Effect on the Quality of Facial Products

YANG Ke-wei¹, LIU Fang-fang¹, ZHENG Yan²

(1. Beijing Dongfu Jiuheng Instrument Technology Co., Ltd., Beijing 100037, China;
2. Henan University of Technology, School of Food Science and Technology, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: Wheat gluten insoluble dietary fiber has special physiological functions. In recent years the attention of domestic and foreign scholars to insoluble dietary fiber from wheat bran has also been increasing year by year. In this paper, the composition and function of wheat bran dietary fiber and wheat bran insoluble dietary fiber were introduced in a brief way. The extraction methods of wheat bran insoluble dietary fiber, such as physical method, chemical method, biological method and chemical-enzymatic method, were introduced briefly. The effect of insoluble dietary fiber from wheat bran on the quality of flour products, such as noodles, steamed bread and bread, was elucidated in order to provide a reference for further research on the extraction method of insoluble dietary fiber from wheat bran and its application in flour products.

Key words: wheat bran insoluble dietary fiber; extraction method; flour products; application

收稿日期: 2023-05-29

作者简介: 杨柯伟, 男, 1989 年出生, 硕士, 工程师, 研究方向为粮油加工及检测技术。E-mail: ykw@graininstru.com

随着生活水平的提高,人们对于日常饮食的营养搭配也愈发重视。特别是随着国内慢性病的频发,我国全谷物食品体系的不断加大,人们对于多谷物食品和含高麸质的食品关注度也急剧升温。小麦粉及其制品是高麸制食品的主要产品开发方向^[1],目前我国已经出现了含高麸质的食品,比如面条、面包、馒头、饼干和蛋糕等,但是普遍存在产品接受度较低的问题。所以,现阶段众多研究工作者在努力开发出品质优良的产品,使营养、品质、口感优质的膳食纤维食品早日出现在人们的餐桌上。

麦麸膳食纤维指从小麦麸皮中提取出的膳食纤维,其中最重要成分是阿拉伯木聚糖。麦麸膳食纤维主要的理化性质为水合性质、持油力、阳离子交换能力、氮自由基(DPPH)自由基清除力和吸附能力^[2]。根据膳食纤维在水中的溶解性,一般将其分为可溶性膳食纤维(SDF)及不溶性膳食纤维(IDF)。可溶性膳食纤维主要由非纤维素多糖组成,主要是阿拉伯胶、果胶、海藻酸和卡拉酸等,可溶性膳食纤维吸水膨胀,能形成凝胶状物质,延长食物在胃中停留时间^[3],增强人体饱腹感,从而对糖尿病、肥胖症有防治作用^[4]。不溶性膳食纤维主要由酚类化合物、纤维素、半纤维素、木质素和壳聚糖组成。不溶性膳食纤维的功能特性主要有膨胀力、持水力、持油力、阳离子交换能力和吸附作用^[5]。不溶性膳食纤维是指不能被消化系统分解且在热水中不溶的膳食纤维,不溶性膳食纤维能吸收水分,刺激胃肠蠕动加速排便,减少粪便中有害物质与肠道接触的时间^[6],降低患肠癌的风险,并防止糖尿病和其他心血管疾病^[7]。为了进一步拓展优质膳食纤维补充渠道,更好地满足大众对健康食品的需求,通过各种手段对不溶性膳食纤维的功能特性加以改善,以及应用在面制品中,均已得到相关研究领域的重点关注。

研究如何开发利用麦麸不溶性膳食纤维,不仅能延长小麦加工产业链,提高其附加值,也为食品工业提供良好的原材料。就麦麸不溶性膳食纤维的提取方法,本文从物理法、化学法、生物法和化学-酶法这四个方面进行研究总结,为麦麸

不溶性膳食纤维的加工提供理论和技术支持,并且进一步的研究了麦麸不溶性膳食纤维对面制品面条、馒头和面包品质的影响,为今后麦麸不溶性膳食纤维在面制品中的研究提供思路。

1 麦麸不溶性膳食纤维的提取方法

随着对麦麸不溶性膳食纤维的研究加深,其提取方法也越来越多,究其根本是利用一系列的方法将麦麸不溶性膳食纤维与其它杂质分离,最终得到较高纯度的麦麸不溶性膳食纤维。本文主要讲述的方法为物理法、化学法、生物法和化学-酶结合法。

1.1 物理法

物理法主要是采用机械以物理作用的方式将麦麸中的不溶性膳食纤维与其它杂质分离,以此来提升麦麸不溶性膳食纤维的纯度,其物理提取法的工艺方法主要有超微粉碎法、高压均质法、筛分法和过滤法等,物理提取法是一种粗提纯方法,可以作为其它提取方法的前处理。

物理提取法首先是将小麦和麦麸分开,再进行筛分、粉碎,最后使用物理分离法将麦麸中的不溶性膳食纤维分离。超微粉碎技术是利用机械或流体动力的方法克服固体内部凝聚力并使之破碎的粉碎技术,最终使物料的大小达到纳米级大小,因其产量大、成本低、工艺简单等优点而广泛应用于食品加工中。采用超微粉碎技术处理麦麸会使麦麸膳食纤维的螯合活性、还原力和总酚含量增加,同时降低了DPPH清除活性,在食品体系中具有较高的分散性和溶解度,超微粉也更容易被人体吸收,从而提高食品的质量和安全性,提高人体健康。麦麸富含膳食纤维,年产量丰富,但未得到充分利用,不溶性膳食纤维往往对食品质量产生负面影响;因此,如何改善麦麸不溶性膳食纤维的理化性质,用于后处理是一个挑战。高压均质技术使料液高速通过均质腔,物料在高速剪切、高频震荡、空穴现象和对流撞击等机械力作用下粉碎细化,并可进一步提高产物的均匀度和稳定性。另一方面,使用高压均质技术和使用高压均质与高强度超声处理结合的方法能够使麦麸不溶性膳食纤维的粒径减小,其溶解性、溶

胀性、持水性、持油性和阳离子交换能力均发生显著变化。利用筛分法制备膳食纤维,可使膳食纤维的纯度可达 88.97%,使麦麸膳食纤维的分离纯度得到有效提高,也使麦麸中淀粉与蛋白质有效分离和高效再利用。

1.2 化学法

化学法是将麦麸进行一系列前处理,然后采用化学试剂来提取不溶性膳食纤维,根据使用试剂的酸碱性不同而又将化学法进行分类,可分为酸法提取、碱法提取、中性水洗法提取和混合法提取。化学法由于成本低廉、提取速度快、提取率高等特点,在不溶性膳食纤维的提取中应用较为广泛,但是,化学法利用了酸、碱和乙醇等化学试剂,会对麦麸膳食纤维的结构产生一定的破坏,改变其物化性质,甚至会影响其活性。目前,大多数实验室采用化学法中的中性洗涤剂法提取不溶性膳食纤维,该方法提取的不溶性膳食纤维品质较好、产率较高。

酸法提取麦麸不溶性膳食纤维主要是将麦麸粉碎之后使用酸进行浸提,WANG 等^[8]研究酸处理对麦麸不溶性膳食纤维理化及功能特性的影响,实验中使用硫酸处理麦麸,结果表明使用酸处理会破坏麦麸不溶性膳食纤维的结构,去除了表面的淀粉颗粒,显著降低了淀粉含量,因此在提取麦麸不溶性膳食纤维时很少使用酸法处理。但是酸法处理在麦麸不溶性膳食纤维的改性中用途较广,能够破坏麦麸不溶性膳食纤维的微观结构,进而改善其功能特性^[9]。

碱法提取麦麸不溶性膳食纤维是利用碱溶液分离不溶性膳食纤维和其他物质,最终提取出不溶性膳食纤维。贾元飞等^[10]研究中以麦麸为原料采用碱法提取麦麸中水不溶性膳食纤维,得出水不溶性膳食纤维的最佳工艺条件为碱浸温度 60 °C,碱处理 pH 为 9,碱浸时间 60 min,在最佳工艺条件下,麦麸中的水不溶性膳食纤维的提取率为 58.87%。利用碱化学法制备不溶性膳食纤维,通过研究料液比、碱浓度、提取时间和提取温度对不溶性膳食纤维提取率的影响,由最佳条件提取不溶性膳食纤维,得到提取率为 70.25%。利用酸法、碱法和酶法分别提取不溶性膳食纤维,最

终得出使用碱法的提取率最高,提取率为 59.12%。在工业生产中,大多采用碱法提取麦麸不溶性膳食纤维,此工艺简单易操作,投入成本低,在加工过程中会破坏麦麸不溶性膳食纤维的结构并对理化性质和生理功能造成显著影响。在碱法提取过程中,如果使用热碱浸泡和用水冲洗不但会降低麦麸不溶性膳食纤维的得率,还会使产品的持水力和膨胀力下降明显,同时会排放大量的污水,对环境造成严重污染。

中性水洗法提取是将麦麸总水溶性物质溶解在水中,从而提取麦麸不溶性膳食纤维,该工艺和酸法、碱法和酸碱提取法不同的是不会对麦麸膳食纤维的结构产生一定的破坏,不会改变其物化性质,不会影响其活性,是一种无污染的膳食纤维提取方法,安全可靠,但是麦麸不溶性膳食纤维的提取纯度会受到影响,有一定的局限性^[11]。中性水洗法在国内外实验室中测定麦麸不溶性膳食纤维时,其提取的麦麸不溶性膳食纤维纯度较高。

使用酸碱混合的方法提取不溶性膳食纤维首先使用酸解然后使用碱解来分离不溶性膳食纤维,这种方法相比较单独使用酸法或者碱法不同的是需要分别得到最佳酸性条件和碱性条件,然后再通过组合得到最佳的实验条件,最终来提高不溶性膳食纤维的提取率。马千里等^[12]研究中采用酸碱结合法提取不溶性膳食纤维,在实验过程中又不断优化酸碱的用量和其他实验条件,通过单因素实验优化实验条件。使用酸碱结合的方法提取麦麸中的不溶性膳食纤维,得出碱的浓度为 4%、处理温度为 70 °C、处理时间为 75 min;酸作用的最佳工艺条件:酸的浓度为 2%、处理温度 70 °C、处理时间 120 min。依据碱与酸作用的最佳工艺条件进行实验,不溶性膳食纤维的得率为 18.12%,由此可见此时麦麸中的不溶性膳食纤维的提取纯度还不是很,但是为之后的研究提供了思路,为之后不溶性膳食纤维的提取纯度的提高打好了基础。

1.3 生物法

生物法指的是利用不同的酶或者使用发酵技术使麦麸中的不溶性膳食纤维和其他物质分离的过程,根据处理的方法不同将其分为酶法和发

酵法。

1.3.1 酶法

酶法主要是通过酶使麦麸中不溶性膳食纤维和其他物质分开,包括淀粉、蛋白质和植酸等物质,从而达到提取不溶性膳食纤维的目的。郭宝颜等^[13]研究表明使用酶法提取不溶性膳食纤维,相比于酸法和碱法其持水力和膨胀力都有所提高,酶法提取不溶性膳食纤维的含量为 52.18%,但是使用碱法提取的最高含量达到了 59.12%。姬玉梅^[14]研究了使用化学法、酸酶法和多酶法提取麦麸膳食纤维,通过对比发现使用多酶法提取麦麸膳食纤维的纯度最高,达到了 87.28%,制备的麦麸膳食纤维所含的淀粉和蛋白质含量最低,淀粉仅有 0.65%,实验过程中得出使用淀粉酶、糖化酶和蛋白酶(1:1:1)结合的方法去除麦麸中的淀粉能使淀粉含量明显降低,能显著提高麦麸膳食纤维的品质。DU 等^[15]研究利用超声辅助酶法提取不溶性膳食纤维,在料液比为 1:20,溶液 pH 为 6.0,温度为 20 °C 下超声 20 min,加入 α -淀粉酶 60 °C,酶解 3.5 h,再加入蛋白酶 55 °C 酶解 3 h,洗涤干燥即得到不溶性膳食纤维。

1.3.2 发酵法

发酵法相比于其他的提取方法而言,其生产工艺条件很温和且具有很强的连续性,使整个工艺的损耗大大降低,对环境的污染也较小,其主要的工艺是将麦麸与培养液合成,工艺也较简单,工业前景很大。麦麸通过使用单一菌种发酵或者混合菌种发酵,在发酵过程中能够将部分不溶性膳食纤维转换为可溶性膳食纤维,提高了可溶性膳食纤维的含量;通过发酵法,麦麸中的不溶性膳食纤维含量也提高了。研究表明采用混合发酵能够有效提高膳食纤维的含量,发酵法与酸法、碱法及酶法相比,发酵对原料要求较低,无需去除淀粉及蛋白质,简化了工艺,降低了对操作的要求^[16]。虽然发酵最后的产品为菌体与小麦麸皮膳食纤维的混合物,但是其成分是符合高纯度膳食纤维的要求的。目前看来,酶法、发酵法是一种新的提取方法,但技术尚不完全成熟。

1.4 化学-酶法

采用酶辅助化学法提取小麦麸皮中的水不溶

性膳食纤维即通过酶及化学处理实现淀粉与蛋白质等非目标组分的去除。麸皮虽然不可直接食用,但其膳食纤维含量高,在食品科技领域得到广泛关注,其可用于制备膳食纤维补充成分而添加到膳食当中,在面制品中的应用也非常的广泛。钟雅云等^[17]研究了酶辅助化学方法提取小麦麸皮中的水不溶性膳食纤维,不溶性膳食纤维提取率为 77.93%。潘建刚等^[18]研究中使用化学-酶法提取不溶性膳食纤维得到最佳提取条件是 α -淀粉酶浓度 0.3%、碱解时间 60 min、碱解温度 45 °C、NaOH 质量分数 4%,该工艺可以有效提高膳食纤维的纯度,可见膳食纤维的提取与多种酶相关,而且研究表明虽然使用化学法获得膳食纤维的得率要高于化学-酶法,但纯度较低,这说明化学-酶法可以有效去除荞麦壳中的蛋白和淀粉类物质。邓催等^[19]研究表明用化学-酶结合法对石磨麦麸处理,提取的不溶性膳食纤维的纯度为 60.38%,利用正交实验得出最佳的条件为混合酶浓度为 0.4%,酶解时间为 50 min,碱液添加量为 4%,碱解时间为 30 min。采用化学-酶法所提取的麦麸不溶性膳食纤维纯度高,但是工艺流程较长,既耗时又耗财力,而且会造成一定的污染。

2 麦麸不溶性膳食纤维对面制品品质的影响

麦麸膳食纤维在食品中的应用广泛,能够作为食品稳定剂和增稠剂、脂肪替代物、应用于乳制品、作为保健品或保健品的添加剂和抗氧化剂。本文主要介绍了麦麸不溶性膳食纤维对面制品品质的影响,主要是对面条、馒头和面包中的影响,面制品制作的主要材料就是小麦粉,小麦粉中的面筋蛋白是一种独特蛋白质,它提供面团独有的延展性和粘弹性,从而影响面制品的品质^[20]。麦麸的聚集特性控制着麸质网络结构的形成,这种结构可以通过麸皮成分,比如不溶性膳食纤维诱导的疏水和/或静电相互作用来改变,进而影响面制品的品质^[21]。

2.1 麦麸不溶性膳食纤维对面条品质的影响

膳食纤维为人体所必需的七大营养素之一,几乎不被人体吸收,摄入量严重不足。我国是小麦生产大国,麸皮产量很高,麸皮中膳食纤维含

量较高,膳食纤维因其特有的功能特性而被广泛应用。而面条制品因易于储藏和流通等优点广受消费者喜爱。将麦麸不溶性膳食纤维添加到面条中,改变面条的品质以及内部结构,补充了膳食纤维的摄取。同时也可以使我国小麦粉的品质现状得到改善,使面制品成为推动人们均衡膳食的有力载体^[22]。

通过将麦麸不溶性膳食纤维添加于面条中,研究其对面条感官评分、色泽、质构指标的影响,实验发现添加3%麦麸不溶性膳食纤维时面条的质构指标均有所改善,这主要是由于不溶性膳食纤维优越的纤维长度和空间结构,在吸水的同时增大自身体积,与面筋蛋白结合形成更大分子的网络结构,使面筋网络结构更稳定,面条的均匀性得到提高,品质得到改善。通过将麦麸不溶性膳食纤维添加到面条粉中,研究其对面条品质的影响,发现当少量添加麦麸不溶性膳食纤维时,蛋白质的面筋网络结构会结合的更加紧密,添加量增加时则会稀释面筋网络结构;添加麦麸不溶性膳食纤维会使面条中水分结合更加紧密,使蛋白质整体稳定性下降;面条的色泽和品质变化与面条中-SH和-S-S-含量和蛋白质结构明显相关,当麦麸不溶性膳食纤维添加量过大时,面条中的-SH含量增大、-S-S-含量减小,蛋白质分子结合紧密程度降低,面条颜色变暗,不利于面条品质的提升。

2.2 麦麸不溶性膳食纤维对馒头品质的影响

由于麦麸膳食纤维特定的物理大分子结构,且与蛋白质、淀粉、脂质、植酸和水等物质发生极为复杂的作用,添加到面团中后势必对面团的流变学特性等产生影响^[23]。面团发酵过程是使面团中含有适宜的菌类,利用破损淀粉、二氧化碳气体使面团内部产生疏松的气孔,这样制成的面制品具有蓬松的结构、期望的质构和适宜的口感,是面包、馒头等面制品制作过程中的必要环节^[24]。

麦麸不溶性膳食纤维有效地提高了面团的机械稳定性,抑制了淀粉的回生,可提高面团的稳定性,增强了面团的机械阻力。WANG等^[25]研究了不溶性膳食纤维对馒头品质和面筋聚集特性的

影响,通过不溶性膳食纤维对面筋网络结构的破坏导致面筋聚集,从而使馒头品质恶化,研究表明,添加不溶性膳食纤维的馒头品质劣化与不溶性膳食纤维诱导的面筋聚集密切相关,馒头的硬度增加,比体积降低,这表明不溶性膳食纤维通过与面筋交联促进面筋聚集,从而形成更密集的面筋网络结构;此外,在醒发和蒸煮阶段,面筋的 ζ -电位值降低了,随着不溶性膳食纤维的增加,表明不溶性膳食纤维通过减少面筋的静电斥力促进面筋聚集。

将麦麸膳食纤维添加于面粉中制作馒头,通过感官评价来研究麦麸膳食纤维添加量对馒头品质的影响;随着麦麸膳食纤维添加比例的增加,麦麸膳食纤维对馒头粉面团有一定的强化作用,面团的弹性和流散性变差,面团逐渐变硬,面筋网络的膨胀能力变差,网络结构受到破坏。

2.3 麦麸不溶性膳食纤维对面包品质的影响

在面包中添加不溶性膳食纤维作为添加膳食纤维的食品体系,已成为世界范围内的一大流行趋势。面包占据着广大的消费市场,其前景可观,添加不溶性膳食纤维能够提高面包的营养价值,能够吸引广大消费者。西方国家对于面包的需求量较大,因此对膳食纤维的应用开展了大量的研究。在国内,对面包的需求量也与日俱增,因此在面包中加入膳食纤维能够发挥其功能性,也对添加膳食纤维之后面包的口感、色泽、风味等感官品质重点关注。不溶性膳食纤维在面包的加工中,能够提升面团的含水量、降低淀粉老化的速率,从而改善货架期,但不溶性膳食纤维会对面包的烘焙品质产生恶劣的影响,集中体现在影响消费者购买感官属性品质的降低。

面包中膳食纤维的添加,使得面包吸水、保水能力增强,麦麸面包的老化得以延缓。通过对麦麸的不同添加量对面包烘焙得率、比容、感官评价影响的研究,发现随着时间的延长,不同添加量的麦麸面包其感官评价得分逐渐下降,随着麦麸添加量超过6%时,面包的感官品质明显下降,导致面包体积小、口感硬、质构粗糙,失去原有弹性;从面包得率、比容分析,麦麸添加量为3%~6%时的面包更符合工业化生产需求。将麦麸

膳食纤维添加于面粉中制作面包, 通过感官评价来研究麦麸膳食纤维添加量对面包品质的影响。实验结果表明, 在面包中添加 5% 麦麸膳食纤维较适宜, 不会明显降低面包和馒头的感官性状和内部品质, 而且口感细腻, 无麸皮干涩味, 感官评分最高。随着麦麸膳食纤维添加比例的增加, 麦麸膳食纤维对面包粉面团有很强的劣化作用。

3 结论与展望

麦麸作为小麦加工的副产物, 一般用在酿造和饲料行业, 附加值不高, 然而随着对麦麸的进一步研究, 逐渐开发出其中更多可利用的物质, 比如膳食纤维, 以及膳食纤维中的水溶性膳食纤维和水不溶性膳食纤维都得到了广泛的研究。本文介绍了麦麸不溶性膳食纤维的提取以及对面粉品质的影响。其中的物理法一般作为麦麸的前处理, 化学法在实验室中使用的较多, 主要是会破坏不溶性膳食纤维的结构, 生物法和化学-酶法的提取率较高但是成本较高, 价格难以接受。

麦麸不溶性膳食纤维添加到面粉制品中会影响面粉制品的品质, 当添加少量时会使面粉制品品质得到改善, 当添加量过多时则会使面粉制品品质恶化。过多添加麦麸不溶性膳食纤维会使面条感官评分、色泽、质构等指标受到影响; 会诱导馒头中面筋网络结构的聚集, 从而破坏面筋网络结构, 进而使馒头品质恶化; 会使面包的感官品质明显下降, 导致面包体积小、口感硬、质构粗糙, 失去原有弹性。因此在面粉制品中添加麦麸不溶性膳食纤维存在一个最佳添加量, 这个添加量对提高面粉制品的品质最为有利。目前对于麦麸不溶性膳食纤维和面粉作用的机理, 我们仍未完全了解, 需要在未来的研究中进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] P. N P V, JOYE I J. Dietary fibre from whole grains and their benefits on metabolic health[J]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 3045.
- [2] 李琦, 曾凡坤, 华蓉, 等. 麦麸膳食纤维理化特性、制备方法及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(17): 352-357.
- [3] LI Q, ZENG F K, HUA R, et al. Research progress on the physicochemical properties, preparation methods and application of wheat bran dietary fiber[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(17): 352-357.
- [4] 孙海燕, 杨梦凡, 郝丹青, 等. 膳食纤维的研究现状[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(6): 238-242.
- [5] SUN H Y, YANG M F, HAO D Q, et al. Study situation of dietary fiber[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(6): 238-242.
- [6] 郭亚辉, 王静. 麦麸膳食纤维对健康人血糖变化的影响[J]. *中国食物与营养*, 2017, 23(7): 68-70.
- [7] GUO Y H, WANG J. Effects of wheat bran dietary fiber on healthy blood glucose changes[J]. *Food and Nutrition in China*, 2017, 23(7): 68-70.
- [8] 宋康, 宋莎莎, 弓志青, 等. 水不溶性膳食纤维生理功能、制备工艺及应用研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(2): 258-262.
- [9] SONG K, SONG S S, GONG Z Q, et al. Properties, physiological function, preparation technology and application of insoluble dietary fiber[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(2): 258-262.
- [10] 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.
- [11] ZHOU X, TANG S Y, YANG H Q, 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.
- [12] 戴春. 麦麸膳食纤维对控制中老年糖尿病患者血糖效果研究[J]. *中国食物与营养*, 2020, 26(3): 57-60.
- [13] DAI C. Effect of wheat bran dietary fiber on blood sugar control in middle-aged and elderly diabetic patients[J]. *Food and Nutrition in China*, 2020, 26(3): 57-60.
- [14] WANG L, TIAN Y, CHEN Y, et al. Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber[J]. *Cereal Chemistry*, 2021.
- [15] 刘宁, 马森, 王晓曦. 麦麸膳食纤维改性方法的比较研究与展望[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(2): 23-25.
- [16] LIU N, MA S, WANG X X. Comparative study and prospect of modified wheat bran dietary fiber[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(2): 23-25.
- [17] 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.
- [18] JIA Y F, SHI S L, LI Y Q, et al. Study on the extraction process of water-soluble dietary fiber from wheat bran[J]. *Modern Salt and Chemical Industry*, 2018, 45(2): 89-90.
- [19] 豆康宁, 王飞. 麦麸不溶性膳食纤维的提取方法[J]. *现代面粉工业*, 2019, 33(2): 34-36.
- [20] DOU K N, WANG F. Extraction methods of wheat bran insoluble dietary fiber[J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2019, 33(2): 34-36.
- [21] 马千里, 裴华, 王展华. 玉米芯不溶性膳食纤维制备工艺的研究[J]. *中国酿造*, 2016, 35(11): 158-161.
- [22] MA Q L, PEI H, WANG Z H. Preparation technology of insoluble dietary fiber from corn cob[J]. *China Brewing*, 2016, 35(11): 158-161.
- [23] 郭宝颜, 邓青, 周爱梅, 等. 茭白不溶性膳食纤维的提取工艺

- 优化及性能对比[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 257-260.
- GUO B Y, DENG Q, ZHOU A M, et al. The process optimization and performance comparisons of insoluble dietary fiber extracted from zizania latifolia[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(23): 257-260.
- [14] 姬玉梅. 小麦麸皮膳食纤维提取方法与组分分析[J]. 粮食问题研究, 2017(5): 21-25.
- JI Y M. Study on extraction method and component analysis of wheat bran dietary fiber[J]. Grain Issues Research, 2017(5): 21-25.
- [15] DU B, ZHU F, XU B. Physicochemical and antioxidant properties of dietary fibers from Qingke (hull-less barley) flour as affected by ultrafine grinding[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2014, 4(2): 170-175.
- [16] 刘杰. 发酵法制备小麦麸皮膳食纤维及理化性质研究[D]. 天津科技大学, 2015.
- LIU J. Research on fermentation preparation and physicochemical properties of dietary fiber from wheat bran[D]. Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [17] 钟雅云, 杨敏, 何沁峰, 等. 海带与小麦麸皮由来不溶性膳食纤维的酶辅助提取及其功能特性比较[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 124-131.
- ZHONG Y Y, YANG M, HE Q F, et al. Enzyme-assisted extraction of insoluble dietary fibers from kelp and wheat bran and comparison of their functional properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(11): 124-131.
- [18] 潘建刚, 黄苗苗, 张艾艾. 酶-化学法提取荞麦壳中水不溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 广东农业科学, 2015, 42(3): 85-88.
- PAN J G, HUANG M M, ZHANG A A. Optimization of insoluble dietary fiber extraction from buck wheat shell by enzymatic-chemical method[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(3): 85-88.
- [19] 邓瑾, 李志建, 李海峰, 等. 酶-化学法提取石磨小麦麸皮不溶性膳食纤维工艺研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 13-16.
- DENG C, LI Z J, LI H F, et al. Extraction of insoluble dietary fibers from stone milled wheat bran by enzymatic-chemical method[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(2): 13-16.
- [20] 马森, 汪楨, 王晓曦. 麦麸膳食纤维对面团特性影响的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 124-131.
- MA S, WANG Z, WANG X X. Research progress on the effect of wheat bran dietary fiber on dough properties[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 124-131.
- [21] 张昂. 麦麸膳食纤维对面团特性影响的研究进展[J]. 现代食品, 2021(11): 28-30.
- ZHANG A. Research progress on the effect of wheat bran dietary fiber on dough properties[J]. Modern Food, 2021(11): 28-30.
- [22] 张佳程. 食品质地学[M]. 中国轻工业出版社, 2010.
- ZHANG J C. Food texture[M]. China Light Industry Press, 2010.
- [23] 马森, 雷梦续, 李力, 等. 麦麸膳食纤维对面制品主成分的影响研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 121-128.
- MA S, LEI M X, LI L, et al. Research progress on the effect of wheat bran dietary fiber on the main ingredients of flour products[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 121-128.
- [24] WANG C, YANG Z, XING J, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107008.
- [25] WANG C, YANG Z, GUO X, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130444. 完