

# 谷物膳食纤维制备及应用研究综述

孙元琳<sup>1</sup>, 李文多<sup>2</sup>

(1. 运城学院 生命科学系, 山西 运城 044000;  
2. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006)

**摘要:**综述了谷物膳食纤维的制备、改性、检测方法以及在食品工业中的应用等方面的研究进展. 尽管近几十年来谷物膳食纤维的研究取得了很大进步, 但对其定义、检测、改性方法、生理功能的体内验证及其作用机制等基础研究以及其工业应用技术还有待进一步深入研究和探索.

**关键词:**谷物; 膳食纤维; 酶-化学法制备; 酶法改性

**中图分类号:** TS210      **文献标志码:** A

## Review of research on preparation and application of cereal dietary fiber

SUN Yuan-lin<sup>1</sup>, LI Wen-duo<sup>2</sup>

(1. Dept. of Life Sci., Yuncheng Univ., Yuncheng 044000, China;  
2. College of Life Sci., Shanxi Univ., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The preparation, modification, new testing methods, and application of cereal dietary fiber in food industry were summarized. Although the research of cereal dietary fiber has obtained a good advance in recent years, the definition, determination, modification methods, in vivo validation of its physiological function, mechanism of action and application technology of cereal dietary fiber in food industry need further research and exploration.

**Key words:** cereal; dietary fiber; enzyme-chemical preparation; enzymatic modification

## 0 引言

近年来, 谷物由于富含膳食纤维而备受关注. 研究发现, 肠道菌群的结构失调是许多因饮食结构不当造成的代谢性疾病的直接诱因<sup>[1]</sup>. 增加谷物膳食纤维的摄入能够有效增殖肠道中的有益菌, 改善肠道菌群结构, 保护肠屏障功能, 对肥胖、糖尿病、高血压、冠心病、心脑血管疾病和结肠癌等慢性疾病具有预防作用<sup>[2-3]</sup>. 由于膳食纤维对人体具有保健作用, 它被列为继糖、蛋白质、脂肪、水、矿物质和

维生素之后的“第七大营养素”, 又被称为“肠道清道夫”. 世界卫生组织在关于膳食、营养与慢性疾病的预防报告中推荐食用全谷物以增加膳食纤维的摄入量.

自1970年代以来, 国内外众多学者对膳食纤维的组成与分类、分离制备、理化性质和生理功能等方面进行了深入研究. 在已开发的膳食纤维产品中, 研究应用最广的是植物性膳食纤维, 而谷物以其极高的膳食纤维含量及丰富的种类成为功能食品领域研究与开发的重心. 本文将着重对谷物膳食

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101244)

作者简介: 孙元琳(1971—), 女, 山西省运城市人, 运城学院副教授, 博士, 主要研究方向为天然产物功能因子.

纤维的制备、改性、新型检测手段及其在食品工业应用几个方面的研究进展进行综述,以期将谷物膳食纤维开发为功能性食品基料提供参考。

## 1 膳食纤维的定义与分类

### 1.1 膳食纤维的定义

膳食纤维 DF(dietary fiber) 是一类复杂混合物的总称。1972年, Trowell 发现膳食纤维的摄入与心脏病、肠道疾病的发生存在密切关系, 随后将那些不能被人体内源酶所消化的植物成分界定为膳食纤维。1976年, Trowell 对膳食纤维做出更为明确的定义, 将那些“不被人体消化吸收的多糖类碳水化合物和木质素”统称为膳食纤维<sup>[4]</sup>。依照上述定义, 膳食纤维是一类植物细胞壁物质, 包括纤维素、半纤维素、果胶和木质素等成分。

随着分析手段的进步和膳食纤维生理功能研究的不断深入, 膳食纤维的诸多功能被人们所认识和关注。2001年, 美国谷物化学家协会 AACC 理事会对膳食纤维的定义进行了修订, 指出膳食纤维包括细胞壁多糖、木质素以及与之键合的不能被人体消化酶水解的物质<sup>[5]</sup>。

由于膳食纤维所包含的组分复杂, 加之随着现代科技和食品工业的高速发展, 出现了很多具有类似膳食纤维功能的食品成分, 如抗性淀粉、低聚寡糖以及菊糖等, 均不符合当前膳食纤维定义的范围, 使得膳食纤维的定义具有局限性。2000年, 美国分析化学家协会 AOAC<sup>[6]</sup> 在关于膳食纤维与复合性碳水化合物的会议上, 指出膳食纤维还应包括不能为人体内源酶所吸收的寡糖及抗性淀粉。2004年, 食品法典委员会在第26届营养与特殊膳食食品委员会报告中将膳食纤维定义为小肠内不能消化吸收, 聚合度不小于3(或10)的碳水化合物聚合物<sup>[7]</sup>。通常认为, 膳食纤维是指不能被人体胃肠道消化酶消化, 但能被大肠内的某些微生物部分酵解和利用的碳水化合物及其相类似物质的总和, 包括细胞壁多糖、低聚糖、木质素以及与之键合的相关物质。

### 1.2 膳食纤维的分类

膳食纤维主要包括谷物纤维、豆类纤维、果蔬纤维、微生物纤维等天然纤维以及合成与半合成纤维。其中, 谷物膳食纤维主要以小麦纤维、燕麦纤维、大麦纤维、黑麦纤维、玉米纤维和米糠纤维为代

表. 膳食纤维的常见分类方法见表1。

表1 膳食纤维分类方法比较

分类方法	种类	包含膳食纤维种类
来源	植物	纤维素、半纤维素、果胶、阿拉伯胶、半乳甘露聚糖
	动物	壳聚糖、胶原
	海藻多糖	海藻酸钠、卡拉胶、琼脂
	人工合成	羧甲基纤维素、甲基纤维素
溶解性	可溶性(SDF)	植物细胞内的储存物质和分泌物, 以及部分微生物多糖和合成类多糖, 如果胶、瓜尔豆胶、海藻酸盐、葡聚糖、真菌多糖和功能性低聚糖等
	不可溶性(IDF)	纤维素、部分半纤维素、木质素
品质	普通	溶性成分含量不超过3%
	高品质	可溶性成分含量10%以上, 持水力 $\geq 7$ g/g, 膨胀力 $\geq 10$ mL/g

所有植物性食品均含有水溶性和水不溶性膳食纤维, 但其含量则有很大差异。就谷物而言, 小麦和黑麦中的水不溶性膳食纤维含量高、水溶性膳食纤维含量低, 而燕麦和大麦中的水溶性与水不溶性膳食纤维的比例则比较均衡。小麦、黑麦和玉米纤维长期以来一直作为食品的天然纤维源, 其水不溶性膳食纤维主要是阿拉伯木聚糖。最近的研究显示, 小麦、黑麦和玉米中的阿拉伯木聚糖可以通过结肠发酵产生短链脂肪酸, 调节肠道功能, 保持肠道健康, 预防便秘和结肠癌, 并在降低血清胆固醇, 改善钙和镁的吸收等方面有积极影响<sup>[8]</sup>。 $\beta$ -葡聚糖是燕麦和大麦中的水溶性膳食纤维, 它可以降低血浆胆固醇, 降低血糖指数, 改善脂质新陈代谢, 对心血管疾病具有明显的预防效果。

## 2 谷物膳食纤维测定方法

由于谷物膳食纤维种类繁多, 且随着膳食纤维定义的不断扩展, 对其具体成分的检测精度要求提高, 膳食纤维的测定方法也在不断地改进更新, 表2列举了目前常用的检测方法。

酶-重量法是1990年代最普遍、最常见的用于对总膳食纤维、可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维进行定量分析的方法。目前, 这一方法被越来越多的国家所采用。近年来, 随着仪器分析技术的完善, 一些新的大型仪器被应用于谷物膳食纤维的检测中, 如近红外光谱技术(NIRS)、气相色谱技术(GC)、高效液相色谱-脉冲安培检测技术(HPLC-PAD)。S. E. Kays等<sup>[9]</sup>最早建立了用NIRS方法预

表2 常用的谷物膳食纤维检测方法

检测方法	重量法(粗纤维法)	酶法	酶-重量法		酶-化学法	
			磷酸缓冲体系	MES-TRIS缓冲体系	酶-分光光度法	酶-色谱法
检测项目	本质素,纤维素	$\beta$ -葡聚糖	总膳食纤维	不溶性、可溶性和总的膳食纤维	已知糖类组成的膳食纤维膳食纤维的单糖及糖醛酸组成	

测谷物产品中总膳食纤维含量的方法. 随后, 他们发现原有模型不适合分析水分含量很高或很低的样品, 于是建立了新的可以分析谷物中不同水分含量样品中总膳食纤维含量的模型<sup>[10]</sup>. 之后, 又相继建立了适用于高糖、高脂肪含量的谷物总膳食纤维含量的模型以及分析 IDF, SDF 的方法, 其检测值与 AOAC 规定的检测方法和结果具有相关性<sup>[11]</sup>.

### 3 谷物膳食纤维的制备与改性

#### 3.1 膳食纤维的制备方法及其在谷物产品中的应用

常用的膳食纤维制备方法比较见表3.

化学法、酶-化学法和酶法是谷物膳食纤维最常见的制备方法. 化学法虽然有诸多缺陷, 但由于方法简单, 故具有一定的应用价值.

石永峰等<sup>[12]</sup>通过对比5种不同提取剂对脱脂米糠中可溶性纤维的得率、色泽等指标, 最终确定了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为最适试剂; 孙元琳等<sup>[13]</sup>采用水提和碱提的方法, 提取黑小麦中膳食纤维的主要成分戊聚糖, 并对其进行了分级纯化, 得到了纯度较高的戊聚糖; 曹银等<sup>[14]</sup>采用中心组合法, 优化了碱法制备大麦糟可溶性膳食纤维的工艺, 使提取率达到 19.28%.

研究人员对于不同谷物的酶-化学法制备条件也进行了系统研究. 李伦<sup>[15]</sup>利用响应面分析优化了酶-化学法制备米糠膳食纤维的工艺, 得出了最佳制备条件; 张钟等<sup>[16]</sup>利用化学试剂结合酶及无水乙醇除去糯玉米皮渣中的淀粉、蛋白质、脂肪和蜡质, 得到较纯净的膳食纤维, 总得率为 62.0%; 郑红艳<sup>[17]</sup>探索了酶-化学法制备小米膳食纤维的最佳提取工艺, 并利用 GC 法对制备物的单糖组分进行了分析; 刘玉林等<sup>[18]</sup>研究了酶-化学法制备小麦麸皮膳食纤维的最佳工艺条件, 并与碱法和酶法进行了对比, 发现酶-化学法制备的产品提取率高于双酶法而低于碱法, 但品质明显优于碱法制备的产

品, 故而酶-化学法是制备小麦麸皮膳食纤维的最优方法. 李芳等<sup>[19]</sup>采用酶碱结合法对燕麦的提取工艺进行了优化, 得到的最优提取工艺使得燕麦麸膳食纤维的得率达 66.12%.

除了酶-化学方法的研究, 近年来利用酶法制备谷物膳食纤维的研究也较多: 许晖等<sup>[20]</sup>采用复合酶解工艺制备米糠的膳食纤维, 并对其制备工艺做了优化, 其酸洗涤纤维含量达 68.54%; 胡叶碧等<sup>[21]</sup>研究了纤维素酶和木聚糖酶对玉米膳食纤维品质的影响, 发现两者都能提高 TDF 的含量, 木聚糖酶对 IDF 的贡献大于对 SDF, 纤维素酶对 SDF 的贡献则大于对 IDF, 而且纤维素酶对 SDF 的提高作用大于木聚糖酶; 伍立居等<sup>[22]</sup>采用淀粉酶去除玉米皮纤维的淀粉, 其产品 TDF 含量达到 59%.

#### 3.2 膳食纤维的改性方法及其在谷物产品中的应用

膳食纤维改性的方法主要分为物理法、化学法和生物法3大类, 具体介绍见表4<sup>[23]</sup>.

在谷物膳食纤维的改性中, 各种改性方法均有一定程度的应用. 物理法改性谷物膳食纤维方面应用较多. 徐树来等<sup>[24]</sup>研究了利用挤压法对米糠膳食纤维改性的条件, 发现当原料含水量为 20%、螺杆转速为 140 r/min、挤压温度为 110℃ 时, 米糠中不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维, 转化率为 10%; 王安建等<sup>[25]</sup>对超微粉碎改性玉米皮膳食纤维技术进行了研究, 发现超微粉碎几乎不改变玉米皮膳食纤维中水不溶性膳食纤维的含量, 当细度控制在 160~200 目时, 其吸水性、吸油性与阳离子交换能力均有明显改善; 陈存社等<sup>[26]</sup>研究发现超微粉碎技术可以使小麦胚芽膳食纤维的持水性及膨胀力大大增加; 刘伟等<sup>[27]</sup>利用瞬时高压技术对麦麸膳食纤维进行了改性处理, 发现该方法能明显改善麦麸的膨胀力、持水能力和结合水能力, 同时改善流变学性质; 李凤<sup>[28]</sup>研究了超高压技术对小麦膳食纤维的改性情况, 结果显示, 处理后样品持水率和膨胀率

表3 膳食纤维制备方法比较

制备方法	简介	优点	不足	应用范围
粗分离法	悬浮法、气流法	可改变原料组分含量(如减少淀粉植酸)	产品纯净度不够	用于原料的处理
膜分离法	利用膜的不同分子截留量制备可溶性膳食纤维	可得到不同分子量的膳食纤维,同时避免了化学法的有机物残留	对设备要求较高,只能用于分类可溶性膳食纤维	由于技术设备问题未应用于实际生产
化学法	酸法、碱法、酸碱结合法和絮凝法	制备膳食纤维简捷	快速产品色泽较差,不易漂白,并且高酸高碱、高温条件会较大的减弱其生理活性	碱法是目前常用的膳食纤维制备手段之一
酶-化学法	先用化学试剂处理再加入各种酶制剂处理,最终得到产品	吸收了酶法和化学法的优点能制备高纯度的膳食纤维	产品的得率较酶法略低	目前膳食纤维制备的主要方法
酶法	多种酶逐一作用除去产品中非膳食纤维成分,最终获得产品	提取条件温和,可以省去部分制备设备,适合淀粉蛋白含量高的原料	工艺复杂,反应时间长,纯度较低	由于生产成本过高,未应用于实际生产
发酵法	用微生物发酵提供的酸性环境,使原料中的成分发生化学反应,得到较纯净的膳食纤维	产品色泽、质地、气味和分散程度均优于化学法,且有良好的持水力和得率	目前还处在研发阶段,应用不广泛	应用范围有待进一步开发完善

都有较大提高,组织结构更加疏松,空隙增多增大,但是黏度和空间机构没有明显变化。

谷物膳食纤维的生物改性主要采用酶法,而发酵法的应用少有报道。胡叶碧等<sup>[21]</sup>研究了用纤维素酶和木聚糖酶对玉米膳食纤维的改性方法,结果表明单独使用2种酶都能增加玉米中可溶性膳食纤维(SDF)的含量,2种酶复合作用能极其显著地增加SDF含量。

化学改性在谷物膳食纤维中也有应用,如李鹏飞等<sup>[29]</sup>利用酸法和碱法对麦麸膳食纤维进行了改性研究,发现酸处理后SDF含量可由8.24%上升到9.5%,碱处理后SDF含量由8.24%上升到11.3%。

此外,还有一些新技术也被应用到谷物膳食纤维的改性当中,如张艳荣等<sup>[30]</sup>利用超临界CO<sub>2</sub>流体萃取技术处理玉米皮膳食纤维,所得玉米活性多糖对肥胖小鼠具有明显的降脂减肥作用。

## 4 谷物膳食纤维在食品工业中的应用

### 4.1 在焙烤食品中的应用

谷物膳食纤维在焙烤食品中有广泛的应用。在面包和蛋糕中,添加膳食纤维作为稳定剂和增稠剂,可用来提高配料的分散性和稳定性、增加产品的持水性、改善质构、延长保质期。葛毅强等<sup>[31]</sup>开发了一种含有米糠膳食纤维的饼干,并通过实验确定了米糠膳食纤维的最适添加量为5%;邓军<sup>[32]</sup>研究了玉米膳食纤维(CDF)在蛋糕中的应用,发现当

CDF含量为5%,加水量为8%及泡打粉用量为1%时,通过调整生产工艺,生产出的蛋糕的感官品质和组织结构均比较理想;赵欣<sup>[33]</sup>研究了玉米膳食纤维在酥性饼干中的应用,发现以15%添加量加入饼干中得到的产品口感疏松舒适、风味纯正;石长波等<sup>[34]</sup>将可溶性玉米膳食纤维添加到面包中,发现可明显改变面包的流变学性质,降低其老化度。

### 4.2 在主食方面的应用

主要是将其添加于馒头、米饭、面条中。馒头中添加适量的膳食纤维可以改善馒头的品质,提高其保健功效。在面条中加入5%的膳食纤维可以使面条韧性增加、耐煮耐泡、清爽适口。在米饭中添加适量膳食纤维可以使米饭更加蓬松清香。

### 4.3 在肉制品中的应用

将谷物膳食纤维添加到肉制品中能提高持水性,且由于其对肉馅的组织结构有支撑作用,故可改善肉的组织结构和韧度。适量谷物膳食纤维的加入在不影响肉制品品质的基础上,可降低肉制品中脂肪与热能的含量,增加产品的保健功效。王仲礼等<sup>[35]</sup>将5%的麸皮加入灌肠制品中发现灌肠的风味、状态、切片性、色泽、滋味及气味都有所改善。

### 4.4 在饮料及乳制品中的应用

将膳食纤维添加到奶粉、乳酸菌乳和冰淇淋中,能将乳制品中乳糖转化为乳酸,更适合乳糖不耐症的消费者食用。在乳酸菌奶中添加膳食纤维,还能作为活性菌的营养源以保持其活性,使产品货

表4 膳食纤维改性技术比较

改性方法	方法介绍	方法评价
物理法		
挤压蒸煮技术	将膳食纤维经高温、高压及剪切使连接其分子化学键断裂,发生分子裂变,从而彻底微粒化的技术	改善物料的营养,风味及生物活性提高膳食纤维的可溶性和消化率
超微粉碎技术	利用动力学及流体力学克服物料内部凝聚力使物料破碎的技术	能有效地改善膳食纤维的物化特性,使其具有良好的乳化性增稠性,提高生物活性,并保证了物料的完整性
瞬时高压技术	以微射流均质机为物质基础的瞬时高压作用,是集混合、超微粉碎、加温、加压、膨化等多单元操作为一体的一门全新技术	增加可溶性膳食纤维的含量,提高持水力,膨胀率等理化性质,同时还具有杀菌作用
超高压技术	指将食品放入液体介质,在100~1000 MPa压力下处理,达到改变食品理化性质的技术	改善膳食纤维的物化特性,降低其粒度,且能有效地降低产品的黏度
生物法		
酶法	利用纤维素酶、木聚糖酶和木质素氧化酶等酶,对膳食纤维进行改性的方法	改性条件温和,反应速度快,专一性强,改性后所得产品纯度高,色泽浅,无异味
发酵法	利用微生物发酵消耗原料中可发酵的碳源、氮源等成分的方式来制取膳食纤维,从而改善膳食纤维的持水力等物化特性的方法	改性产品口感更香甜,粗纤维含量更高,持水力更大,生理活性更好,且生产过程简便,成本低廉,产品无异味,易于实现工业化
化学法		
酸法,碱法	通过调整pH值、温度等反应条件,使糖苷键断裂产生新的还原性末端,并使纤维大分子的聚合度下降,部分转化为非消化性的多糖,来改变膳食纤维功能特性的方法	改性较彻底,经改性的产品水溶性膳食纤维含量增加较多,但存在反应时间长、副反应多、工艺复杂、对设备要求较高等不足

架期延长,增强乳制品良好的口感和风味.在功能性饮料中添加膳食纤维,除具有保健作用外,还可以明显提高食品的稳定性和分散性,防止结块.郑焱焱等<sup>[36]</sup>以米糠为原料,将其添加0.8%纤维素酶水解,辅以3%奶粉、1%变性淀粉和6%蔗糖通过乳酸菌发酵生产出富含膳食纤维的功能性营养米糠酸奶产品.王林山等<sup>[37]</sup>将玉米膳食纤维以6%的添加量加入脱脂乳中,用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌发酵,得到色泽均匀、组织形态细腻、口感适中、风味绝佳的功能性乳饮料.王大为等<sup>[38]</sup>将玉米膳食纤维添加到冰淇淋中,发现冰淇淋口感滑润细腻,膨胀率为98%,抗融性较好.

#### 4.5 在调味料中的应用

利用膳食纤维的吸水、吸油、保水、保香等性质,将其添加到豆酱等食品中,以便保鲜和防止水的渗透.膳食纤维添加在沙司、蛋黄酱中可作为黏度调节剂.人们将谷物膳食纤维与某些食品添加剂如木糖醇等甜味剂以及动植物油脂、山梨酸、焦糖色素、微量元素等营养成分混合加热制成馅料,用于汉堡包馅、牛肉馅饼的生产.膳食纤维作为低热量的基料以取代脂肪添加在火腿肠、午餐肉、三明治、肉松等食品中,从而降低脂肪和胆固醇的摄入.

#### 4.6 在保健食品中的应用

流行病学研究表明,谷物膳食纤维能够降低胆固醇水平、降低血糖含量、改善肠道功能、调节肠道菌群、保护肠屏障功能、增强机体的免疫力,对慢性

代谢性疾病,如肥胖、II型糖尿病、心脑血管疾病以及结肠癌等具有预防作用.其中以润肠通便、排毒养颜和减肥美容的保健品最为流行.添加膳食纤维可促使体内产生乳酸,而乳酸可以分离溶解钙、镁、铁等矿物质,促进人体对矿物质元素的吸收.

## 5 展望

大量关于全谷物膳食纤维摄入与慢性疾病关系的流行病学研究结果表明:长期摄入全谷物食品对糖尿病、肥胖、心血管疾病以及结肠癌等慢性疾病具有预防作用.尽管近几十年来,谷物膳食纤维的研究取得了很大突破,但对其定义、检测、改性方法、生理功能的体内验证及其作用机制等基础研究以及工业应用技术还有待更深层次的研究和探索.其发展趋势主要有:1)深入研究膳食纤维的改性方法及其对理化性质和生理功能的影响.2)加强对膳食纤维生理功能及其作用机制的深层次研究.总之,作为21世纪最具开发潜力的营养素之一,谷物膳食纤维的研究和应用具有广阔的发展空间和市场前景.

#### 参考文献:

- [1] Ley R E, Turnbaugh P J, Klein S, et al. Microbial ecology: human gut microbes associated with obesity[J]. Nature, 2006, 444:1022.
- [2] Lim C C, Ferguson L R, Tannock G W. Dietary fiber as

- “prebiotics”: Implications for colorectal cancer [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2005, 49: 609.
- [3] Mellen P B, Walsh T F, Herrington D M, et al. Whole grain intake and cardiovascular disease: a meta-analysis [J]. *Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2008 (18): 283.
- [4] Seal C J. Whole grains and CVD risk [J]. *Proc of the Nutrition Society*, 2006, 65: 24.
- [5] American Association of Cereal Chemists. The definition of dietary fibre Report of the dietary fibre definition committee to the board of directors of the AAC [J]. *Am J Public Health*, 2001, 89: 322.
- [6] Prosky L. What is dietary fiber [J]. *J of AOAC Int*, 2000, 83(4): 985.
- [7] Devries J W, Prosky L, Li B, et al. A historical perspective on defining dietary fiber [J]. *Cereal Food World*, 1999, 44(5): 367.
- [8] Andersson Ulrika, Rose'n Liza, stman Elin O, et al. Metabolic effects of whole grain wheat and whole grain rye in the C57BL/6J mouse [J]. *Nutrition*, 2010, 26: 230.
- [9] Kays S E, Windham W R, Barton F E. Prediction of total dietary fiber in cereal products using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(8): 2266.
- [10] Kays S E, Barton F E, Windham W R, et al. Prediction of total dietary fiber by near-infrared reflectance spectroscopy in cereal products containing high sugar and crystalline sugar [J]. *J Agric Food Chem*, 1997, 45(10): 3944.
- [11] Kays S E, Windham W R, Barton F E. Prediction of total dietary fiber by near-infrared reflectance spectroscopy in high-fat-and high-sugar-containing cereal [J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46(3): 854.
- [12] 石永峰,戴红霞. 从脱脂米糠中提取可溶性膳食纤维 [J]. *粮食饲料与工业*, 1996(3): 17.
- [13] 孙元琳,李文多,张生万,等. 黑小麦麦麸戊聚糖的提取、纯化与组成分析 [J]. *中国食品学报*, 2010, 10(5): 54.
- [14] 曹银,杨芳,周露. 碱法与酶法提取大麦糟膳食纤维的比较 [J]. *现代食品科技*, 2011, 27(3): 317.
- [15] 李伦. 脱脂米糠膳食纤维的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [16] 张钟,王德生. 玉米膳食纤维对实验性高脂血症小鼠降脂作用的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2005, 20(5): 120.
- [17] 郑红艳. 小米麸皮膳食纤维的提取及成分和功能性质研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [18] 刘玉林,吴光旭,李庆龙. 麦麸膳食纤维的制备与改性研究 [J]. *湖北农学院学报*, 1998, 18(1): 43.
- [19] 李芳,刘英,陈季旺,等. 燕麦膳食纤维提取的影响因素研究 [J]. *粮食与饲料工业*, 2006, 12: 20.
- [20] 许晖,孙兰萍,张斌. 酶解法制米糠膳食纤维 [J]. *中国粮油学报*, 2007, 22(4): 117.
- [21] 胡叶碧,王璋. 纤维素酶和木聚糖酶对玉米皮膳食纤维组成和功能特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2006, 27(11): 103.
- [22] 伍立居,李平,汪锦邦. 从玉米皮及豆皮中制取食用纤维的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 1996(5): 44.
- [23] 申瑞玲,王英. 膳食纤维的改性及其对功能特性的影响 [J]. *农产品加工*, 2009, 166(3): 17.
- [24] 徐树来,贾春玲,陈莎莎. 挤压加工米糠膳食纤维的试验研究 [J]. *农机化研究*, 2005, 1: 205.
- [25] 王安建,魏书信,侯传伟. 超微粉碎改性玉米皮膳食纤维技术研究 [J]. *食品科技*, 2010, 35(9): 194.
- [26] 陈存社,刘玉峰. 超微粉碎小麦胚芽膳食纤维物化性质的影响 [J]. *食品科技*, 2004, 29(9): 88.
- [27] 刘伟,刘成梅,黎冬明,等. 瞬时高压作用对麦麸膳食纤维改性的研究 [J]. *食品科学*, 2006, 27(11): 82.
- [28] 李凤. UHP 处理对小麦膳食纤维的改性研究 [J]. *食品科学*, 2007, 28(9): 96.
- [29] 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.
- [30] 张艳荣,马福敏,王大为. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取玉米皮纤维类物质的研究 [J]. *食品科学*, 2005, 26(6): 149.
- [31] 葛毅强,石晶晶,闫红,等. 米糠膳食纤维饼干的研制 [J]. *粮油食品*, 2003, 11(1): 22.
- [32] 邓军. 玉米膳食纤维在蛋糕生产中的应用研究 [J]. *粮油加工*, 2008, 33(1): 44.
- [33] 赵欣. 玉米皮膳食纤维在酥性饼干中的应用 [J]. *食品科技*, 2010, 35(4): 168.
- [34] 石长波,马永强,韩春然,等. 可溶性玉米膳食纤维在面包中的应用 [J]. *食品科学*, 2007, 28(5): 181.
- [35] 王仲礼,赵晓红. 膳食纤维麦麸在灌肠中的应用研究 [J]. *肉类工业*, 2005, 22(11): 28.
- [36] 郑煜焱,曾洁,李新华,等. 米糠膳食纤维酸乳饮料的研制 [J]. *食品工程*, 2007(3): 93.
- [37] 王林山,王松江,杨玉娟. 玉米膳食纤维酸奶的研制 [J]. *粮食与食品工业*, 2006, 13(5): 32.
- [38] 王大为,张艳荣,张雁凌,等. 玉米膳食纤维在冰激凌中的应用的研究 [J]. *食品科学*, 2003, 24(4): 107.