

# 小麦面筋蛋白研究进展

王岸娜,陈丛丛,吴立根

(河南工业大学 粮油食品学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**小麦面筋蛋白是一种营养丰富、物美价廉的植物性蛋白,在食品和非食品领域都有着广泛的应用。但由于天然的小麦面筋蛋白流变性和热稳定性相对较差,使其应用范围受到一定的限制。因此,小麦面筋蛋白的改性对开发其新的应用价值显得尤为重要。综述了小麦面筋蛋白结构和功能性质的一些影响因素,探讨了小麦面筋蛋白的几种改性方法,以期为提高小麦面筋蛋白的应用价值提供支撑。

**关键词:**面筋蛋白;改性方法;研究进展

**中图分类号:**TS 210.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2017)05-0019-05

## Research progress of wheat gluten protein

WANG An-na, CHEN Cong-cong, WU Li-gen

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001)

**Abstract:**Wheat gluten protein is a nutrient-rich and inexpensive vegetal protein source, and it has wide applications in the food and non-food areas. The rheology and thermal stability of the natural wheat gluten protein is relatively poor, which has some restrictions to some extent in its scope of applications. Therefore, it is particularly important for the development of its new application value. The effects of some factors on wheat gluten protein structure and functional properties were summarized, and several modification methods of wheat gluten protein were discussed to improve its application value.

**Key words:**gluten protein; modification methods; research progress

小麦面筋蛋白,俗称谷朊粉,是从小麦中提取的天然蛋白质,主要包括麦谷蛋白和麦醇溶蛋白,约占小麦蛋白质含量的75%~85%。据统计,全世界面筋蛋白年产量约60万t,我国的年产量约10万t,主要作为小麦粉改良剂、营养添加剂等,用于小麦粉、饲料、食品等领域。随着小麦淀粉市场需求量的增加,小麦面筋蛋白产量也不断增长<sup>[1]</sup>。

在食品领域,由于小麦面筋蛋白吸水后能形成具有网络结构的湿面筋,具有优良的粘弹性、延伸性以及薄膜成型性等特性,可满足多种功能的需要,因此,常用于各类食品的生产<sup>[2]</sup>。但由于小麦面筋蛋白自身独特的氨基酸组成,含有较多的疏水性氨基酸和不带电荷的氨基酸,溶解度较低,不能满足食品加工的要求,在实际生产和生活中的应用受到限制。

因此,研究开发小麦面筋蛋白新的应用领域,提高其经济价值显得尤为重要。

## 1 小麦面筋蛋白的影响因素

小麦面筋蛋白富含谷蛋白和麦醇溶蛋白,主要用作小麦粉改良剂。Barak等<sup>[3]</sup>研究表明,面筋蛋白是决定不同品种小麦制作面条品质好坏的重要因素。小麦蛋白的质量和数量对生产高质量的面条起到决定性作用,面条的硬度和表面光滑度与小麦粉中蛋白质的含量呈正相关,面条的硬度和弹性与小麦粉中面筋特性有很大关系<sup>[4-6]</sup>。Kaur等<sup>[7]</sup>证实了硬粒小麦粉中的麦醇溶蛋白和麦谷蛋白的理化性质对面条的结构特性有显著影响。

### 1.1 食用胶

汪星星等<sup>[8]</sup>研究发现,在面制品中添加食用胶可以稳定体系的乳化和起泡等特性,提高其流变学性能和质构性能。赵雷等<sup>[9]</sup>等研究了不同浓度的κ-卡拉胶对面筋蛋白结构和功能特性的影响,结果表明,κ-卡拉胶加入到面筋蛋白中后,蛋白质的

收稿日期:2017-3-27

基金项目:国家自然科学基金(31201294);粮食公益性行业科研专项(201313011);河南省基础与前沿技术研究计划(152300410077);河南工业大学省属高校基本科研业务费专项资金(2014YWJC05)

作者简介:王岸娜,1972年出生,女,教授。

通讯作者:吴立根,1969年出生,男,副教授。

二级结构发生了 $\alpha$ 螺旋向 $\beta$ 转角的转化,改变了面筋蛋白的功能特性,持水性从103% (原面筋蛋白) 上升至107% (添加0.3%卡拉胶),储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )也明显增大了。李冰等<sup>[10]</sup>研究发现黄原胶的添加能明显增加面筋蛋白的持水性,当黄原胶的添加量为面筋蛋白质质量的0.075%时,面筋蛋白的溶解度由3.30 mg/mL 上升到4.08 mg/mL,增大了面筋蛋白的溶解度,减少了面筋蛋白大分子之间的聚集。Xuan 等<sup>[11]</sup>研究了冷冻保存过程中不同水平(0.5%,1%和2%)的羟丙基甲基纤维素(HPMC)添加量对小麦谷蛋白流变学、热学以及物理化学性质的影响,结果表明,在相同的冷冻储存时间内,可冷冻水的含量随 HPMC 添加水平的增加而逐渐降低,HPMC 可延缓水状态从不可冻结到可冻结的转变;随着冷冻储存时间的增加,2% HPMC 添加水平可通过抑制重结晶,稳定谷蛋白的网络,从而使其具有更均匀的微观结构。

## 1.2 抗氧化剂

食品添加剂在一定程度上可改善和提高食品色、香、味以及口感等感官品质,改进食品的加工条件,提高食品的营养价值,延长保质期,维护食品安全<sup>[12]</sup>。天然抗氧化剂可作为食品添加剂,防止食品腐败变质,提高其保藏性能<sup>[13]</sup>。多酚类物质是常用的抗氧化剂之一,研究表明,外源的或固有的植物源多酚的存在会对小麦面团加工性能产生影响,且影响程度因多酚含量和来源而不同<sup>[14-15]</sup>。胡思等<sup>[16]</sup>通过研究添加不同质量分数茶多酚的面筋蛋白分散液,结果表明了茶多酚质量分数在2%、3%时,面筋蛋白分别具有较好的泡沫稳定性和溶解度;面筋蛋白的乳化性和乳化稳定性都随茶多酚添加量的增加呈现先增大后减小的趋势,在添加量为2%时,其乳化稳定性最好。Wang 等<sup>[17]</sup>研究了单宁对谷蛋白物理化学和结构性质的影响,结果表明,含有单宁的面团中 $\beta$ -转角和 $\alpha$ -螺旋构象增加,而 $\beta$ -折叠构象在 FTIR 检测时降低。此外,单宁的添加还可促进面筋蛋白的聚集,改善面筋网络的微观结构。

## 1.3 乳化剂

乳化剂可作为面团改良剂和面包抗老化剂。硬脂酰乳酸钠和单甘酯是常见的用于面包制作的乳化剂。由于它们亲水/亲脂平衡性能高,在混合过程中可通过与谷蛋白相互作用,引起谷蛋白聚集并增加面团强度,其中分子的亲脂性尾部将结合到谷蛋白的疏水位点。AV Gomez 等<sup>[18]</sup>通过拉曼光谱分析了

乳化剂引起谷蛋白二级结构的变化,结果表明,硬脂酰乳酸钠在0.5%且主要在0.25%水平产生蛋白质折叠,其中 $\alpha$ -螺旋构象增加, $\beta$ -折叠和无规卷曲减少;对于0.5%的谷蛋白-单甘油酯二乙酰酒石酸酯体系,可观察到相同的行为,但程度较低。M Niu 等<sup>[19]</sup>利用酶和乳化剂改进全麦面条的微结构和感官性质,发现全麦面团的稳定性通过转谷氨酰胺酶(TG)和硬脂酰乳酸钠(SSL)形成更紧密的面筋网络,从而使面筋强度得到增强;扫描电子显微镜微结构图证实了TG和SSL促进了面筋网络的连通性和全麦面条淀粉颗粒的覆盖;TG和SSL是增强全麦面团面筋强度和全麦面条质量的有效成分。

## 1.4 冻藏

面制品在冻藏过程中,冰晶会发生迁移和重结晶,导致面筋蛋白变性,从而使产品出现表皮脆化,弹性丧失,风味减退等问题<sup>[20-21]</sup>。通常,由冷冻面团制成的面包比未冷冻或新鲜面团制成的面包具有更低的质量<sup>[22]</sup>。在冻融冻藏过程中,面筋蛋白分子量会发生更严重的解聚现象,而面筋蛋白在冻藏过程中发生的解聚是由麦谷大分子蛋白的解离引起的<sup>[23-24]</sup>。刘国琴等<sup>[25]</sup>采用了圆二色谱法表征了冻藏对面筋蛋白二级结构的影响,说明在恒温冻藏模式下,冻藏时间达到或超过90天,才对面筋蛋白的二级结构产生影响,而在冻融模式下,冻藏60天便可产生影响。赵雷等<sup>[26]</sup>研究了恒温冻藏对面筋蛋白结构及热力学特性的影响,结果表明,冻藏后面筋蛋白发生了解聚现象,网络状结构变得明显疏松,且麦谷蛋白的裂解温度随着冻藏时间的增加呈下降趋势,热稳定性下降。

## 2 改性技术

我国是小麦生产大国,面筋蛋白作为小麦淀粉生产的副产物,来源广泛,价格低廉,营养丰富。面筋蛋白是一种传统的食品添加剂和品质改良剂,但由于其含有较多的疏水性氨基酸,分子内疏水性区域较大,导致溶解性较低,限制了其在食品工业中的应用。因此,通过物理、化学或酶法改性提高面筋蛋白的溶解度,改善其功能性质,以拓宽其应用范围,提高产品的附加值,从而提高经济效益。

### 2.1 物理改性

物理改性是通过改变蛋白质的聚集体形态、蛋白质构象和多肽链松散度以改善其功能性质。该方法无毒副作用,对食品的营养价值影响较小,但效果不显著。目前用于小麦面筋蛋白物理改性的方法主

要有机械搅拌、热处理、高压处理、超声处理、挤压处理以及微波处理等。

超声技术是基于使用频率高于 20 kHz 的机械波,当液体经受高强度超声时,会产生声空化的物理现象<sup>[27]</sup>。在蛋白质上应用时,超声会对蛋白质的水合、分子大小、疏水性和构象产生影响<sup>[28-29]</sup>。研究发现经过超声处理,蛋白质的结构变化会影响其功能性质,如溶解度、粘度、乳化性和凝胶性等<sup>[30-31]</sup>。黄达伟等<sup>[32]</sup>研究了超声对小麦面筋蛋白功能性质的影响,结果表明,在相同的超声处理条件下,当超声时间达到 20 min 时,小麦面筋蛋白的氮溶解指数、持水性以及持油性达到最大值,起泡性和乳化性也得到较大程度提高。食品挤压重组技术是一种高效、节能、环保的食品加工新技术,对植物蛋白进行加工时,可显著改善蛋白质的质地、口感和营养价值,有利于人体消化吸收,提高植物蛋白的利用率<sup>[33]</sup>。在挤压过程中,有大量的二硫键生成,挤压组织化使小麦面筋蛋白的亚基以二硫键和酰胺键的形式发生聚合,导致其分子结构发生变化,从而影响面团的混合、成膜以及面包的制备性质等<sup>[34]</sup>。VL Pietsch 等<sup>[35]</sup>研究了工艺条件对小麦谷蛋白在高水分挤压加工过程中聚合行为变化的影响,发现了小麦谷蛋白聚合反应主要发生在挤出机的螺杆区域,在所研究的范围内,挤出机压力和特定机械能量输入对聚合反应没有显著影响,挤出机温度在 90 ~ 160 °C 时可引起聚合行为的显著变化。M Martínez 等<sup>[36]</sup>用挤压小麦粉代替 5% 的小麦粉对面团进行混合,降低了面团的延展性,但增加了其韧性和产气能力。经微波处理后,傅里叶红外光谱 (FTIR) 测得的小麦面筋蛋白二级结构变得松散,原来聚合结构变得伸展<sup>[37]</sup>。刘国琴等<sup>[38]</sup>研究了动态高压微射流对小麦面筋蛋白功能性质的影响,结果说明,微射流处理可以增加小麦面筋蛋白的溶解度,而压力对其溶解度的影响与蛋白质的浓度有关,最佳浓度为 4%;在浓度不变,压力继续增大时,起泡性减小,泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性均增大。

## 2.2 化学改性

化学改性是通过改变蛋白质分子侧链基团或主链结构而改变其功能性质。该方法虽然可改善面筋蛋白的一些功能特性,但容易造成化学试剂残留,产生毒害作用。化学改性的方法主要有糖基化、磷酸化、脱酰胺、酰化以及蛋白质交联作用等。研究表明糖基化改性能提高面筋蛋白的溶解性和乳化性,增

加其表面疏水性,且葡聚糖与面筋蛋白反应产物的乳化活性和稳定性高于葡萄糖和乳糖<sup>[39]</sup>。张利兵等<sup>[40]</sup>采用多聚磷酸钠对小麦醇溶蛋白进行磷酸化改性,在聚磷酸钠与小麦醇溶蛋白之比为 1:2,反应时间 1 h,反应温度 25 °C, pH 9.5 时,蛋白的粘度、溶解性、乳化性、起泡性等功能性质都有明显提高。廖兰等<sup>[41]</sup>研究了在湿热条件下,可食性有机酸(琥珀酸)具有脱酰胺作用,降解小麦面筋蛋白,结果显示在 6 ~ 10 min,小麦面筋蛋白三维网络结构发生显著的变化,表明了湿热条件下琥珀酸对小麦面筋蛋白脱酰胺作用具有较高的特异性。

## 2.3 酶法改性

酶法改性由于其专一性强,条件温和,反应速率快,可使肽键断裂而保持氨基酸的结构和构型不变,因而被广泛应用于食品工业中。酶法改性可保持食品的营养成分,不会对人体健康造成潜在危害。主要有水解、去酰胺、交联改性等酶改性方法。

近些年来,采用酶解法对小麦面筋蛋白进行改性,主要集中于以下 3 方面的研究:一是基于小麦面筋蛋白理化性质与功能性质的关系,通过酶法增大小麦面筋蛋白的溶解性以改善其功能性质;二是酶解小麦面筋蛋白制备生物活性多肽;三是将小麦面筋蛋白不同组分酶解得到的肽段进行分析,以获得蛋白质的基因结构信息。孟丹阳等<sup>[42]</sup>在研究酶解小麦面筋蛋白中发现,在酶底比相同的情况下,碱性蛋白酶具有更高的水解度;随着水解度的增大,氮溶解指数、起泡能力指数、泡沫稳定指数、乳化活力指数、乳化稳定指数都是先升高后降低,且峰值均在水解度 8.8% ~ 10.5% 范围内。Li 等<sup>[43]</sup>发现碱性蛋白酶—木瓜蛋白酶连续处理小麦粉比单一酶处理可更有效地降低麦醇溶蛋白含量,在连续酶处理的最佳条件下,麦醇溶蛋白几乎被完全去除,导致小麦粉提取物显示出最低的 IgE 结合。A Amiri 等<sup>[44]</sup>研究了葡萄糖氧化酶 (GOX) 和木聚糖酶 (XYL) 对谷蛋白—淀粉分离和谷蛋白物理化学性质的影响,结果表明,80 mg/kg GOX 的添加水平提高了谷蛋白产量,改善了面筋质量,降低了谷蛋白的可延伸性和游离巯基量,使其具有较高的面筋网络强度;XYL 可提高谷蛋白产量,通过水解木聚糖和降低粘度,增加了聚集的趋势,增加酶剂量可增加面筋的延伸性。王凯强等<sup>[45]</sup>对小麦面筋蛋白经胰蛋白酶限制性酶解和谷氨酰胺转氨酶 (TG 酶) 交联后流变特性和热特性变化进行研究,发现限制性酶解和 TG 酶交联

可提高小麦面筋蛋白的弹性模量(G)和热变性温度(Tg);适当的限制性酶解有利于TG酶催化小麦面筋蛋白形成致密的小麦面筋网络结构。孙婕等<sup>[46]</sup>以小麦面筋蛋白粉为原料,采用复合酶法制备小麦面筋蛋白多肽,结果表明在反应时间2 h、反应温度50 ℃、酶比例2:1,反应pH 8.5的条件下,小麦面筋蛋白的水解度最高,达到29.9%;通过DPPH清除率和Fe<sup>3+</sup>还原力测定,可初步判定采用复合酶法得到的小麦面筋蛋白多肽具有抗氧化活性。

#### 2.4 复合改性

随着食品工业的迅猛发展,2种或2种以上复合的改性技术能更有效地改善小麦面筋蛋白的功能特性,高效制备目标产物,拓宽应用范围。赵谋明等<sup>[47]</sup>采用脱酰胺处理和双酶协同作用方式对小麦面筋蛋白进行酶解,发现单独热处理对酶解效率无显著影响,添加柠檬酸溶液后可显著提高酶解效率,在一定水解作用时间内添加谷氨酰胺酶和胰酶,可使水解度达9.88%,酶解产物自由基清除能力ABTS<sup>+</sup>值和氧化自由基吸收能力值分别达478.95 mmol/g和213.85 μmol/g。李娟等<sup>[48]</sup>采用壳聚糖—醋酸对小麦面筋蛋白进行改性,发现其溶解度由0.35 g/L提高到了7.69 g/L,二级结构也发生了较大变化。邵平等<sup>[49]</sup>对小麦面筋蛋白进行琥珀酰化和蛋白酶复合改性,发现复合改性的面筋蛋白溶解度随水解度的增大而增大,比单一改性的产物都高,起泡性和起泡稳定性先增大后降低,且添加复合改性面筋蛋白的面团粘弹性和延伸性都得到提高,面包蜂窝均匀、细腻,口感较好。周非白等<sup>[50]</sup>对琥珀酸脱酰胺改性后的小麦面筋蛋白进行超声处理研究,优化最佳条件后发现小麦面筋蛋白的氮溶解指数达到77.28%,起泡性提高约11%,泡沫稳定性提高20%,其乳化性以及稳定性都有明显提高。臧艳妮等<sup>[51]</sup>采用超声对小麦面筋蛋白进行糖基化改性,结果表明,适当的超声处理有利于小麦面筋蛋白的糖基化改性,在处理40 min时,乳化活性及乳化稳定性分别达到56.82 m<sup>2</sup>/g和36.27 min。

#### 2.5 基因工程改性

基因工程改性是通过重组蛋白质的基因,改变蛋白质的结构,从而改善其功能性质。小麦的烘烤品质主要取决于小麦粉中的面筋蛋白,其中高分子量谷蛋白亚基决定着面团的弹性和延展性,通过定点改变相应位点基因,可改善面筋蛋白的功能性质,从而提高小麦的烘烤品质<sup>[52]</sup>。但由于该技术周期

较长,见效较慢,目前仍不能广泛应用,仍处于实验室阶段。

### 3 展望

近些年来,国际上对小麦面筋蛋白的需求量一直呈上升趋势。我国作为一个小麦生产大国,有很大的市场潜力。但目前我们对小麦面筋蛋白的一些改性机理研究还不够深入,尤其是改性后所产生的营养学和毒理学问题研究更少,因此,寻求小麦面筋蛋白科学合理的改性方法以减少其改性后产生的营养学和毒理学问题将是今后的研究重点。此外,我们仍需加强小麦面筋蛋白在可降解热塑性材料、污水处理固化剂等非食品领域的研究,拓宽其应用范围,提高产品附加值,以获得更大的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 张海华,周慧明. 小麦面筋蛋白结构及其改性研究[J]. 粮食与油脂,2010(9):1-3.
- [2] 颜翠花,张英. 不同方法测定面筋吸水量的比较分析[J]. 内蒙古民族大学学报,2011(2):45-49.
- [3] Barak S, Mudgil D, Khatkar B S. Effect of compositional variation of gluten proteins and rheological characteristics of wheat flour on the textural quality of white salted noodles[J]. Int J Food Prop, 2013, 17:731-740.
- [4] Park C S, Hong B H, Baik B K. Protein quality of wheat desirable for making fresh white salted noodles and its influences on processing and texture of noodles[J]. Cereal Chem, 2003, 80:297-303.
- [5] Baik B K, Lee M R. Effects of flour protein and starch on noodle quality[J]. In Asian Noodles, 2010:261-283.
- [6] Gulia N, Khatkar B S. Quantitative and qualitative assessment of wheat gluten proteins and their contribution to instant noodle quality[J]. Int J Food Prop, 2014, 18(8):1648-1663.
- [7] Kaur A, Singh N, Kaur S, et al. Relationship of various flour properties with noodle making characteristics among durum wheat varieties[J]. Food Chem, 2015, 188:517-526.
- [8] 汪星星,余小林,胡卓炎,等. 冷冻面制品的研究现状及改良进展[J]. 粮食与油脂,2015,28(7):5-8.
- [9] 赵雷,张小梅,余小林,等. κ-卡拉胶对面筋蛋白功能特性及结构的影响[J]. 食品科技,2016(8):153-158.
- [10] 李冰,范鹏辉,赵雷,等. 黄原胶对面筋蛋白流变特性的影响[J]. 现代食品科技,2016,32(2):33-39+65.
- [11] Xuan Y F, Zhang Y, Zhao Y Y, et al. Effect of hydroxypropylmethylcellulose on transition of water status and physicochemical properties of wheat gluten upon frozen storage[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63:35-42.
- [12] 张辉,贾敬敦,王文月,等. 国内食品添加剂研究进展及发展趋势[J]. 食品与生物技术学报,2016(3):225-233.
- [13] 郑萍. 天然抗氧化剂的应用与进展[J]. 科技展望,2016(1):123-124.
- [14] Sivam A S, Sun - Waterhouse D, Perera C O, et al. Exploring the interactions between blackcurrant polyphenols, pectin and wheat bio-

- polymers in model breads; a FTIR and HPLC investigation[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(3): 802–810.
- [15] Sivam A S, Sun – Waterhouse D, Perera C O, et al. Application of FTIR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols[J]. *Food Research International*, 2013, 50: 574–585.
- [16] 胡思, 李华, 王斌, 等. 茶多酚对小麦面筋蛋白功能性质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2015(6): 16–20.
- [17] Wang Q, Li Y, Sun F S, et al. Tannins improve dough mixing properties through affecting physicochemical and structural properties of wheat gluten proteins[J]. *Food Research International*, 2015, 69: 64–71.
- [18] Gomez A V, Ferrer E G, Anon M C, et al. Changes in secondary structure of gluten proteins due to emulsifiers[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2013, 1033(5): 51–58.
- [19] Niu M, Hou G G, J Kindelspire, et al. Microstructural, textural, and sensory properties of whole – wheat noodle modified by enzymes and emulsifiers[J]. *Food Chemistry*, 2017, 223: 16–24.
- [20] Simmons A L, Serventi L, Vodovotz Y. Water dynamics in microwave par – baked soy dough evaluated during frozen storage[J]. *Food Research International*, 2012, 47(1): 58–63.
- [21] Meziani S, Jasniewski J, Ribotta P, et al. Influence of yeast and frozen storage on rheological, structural and microbial quality of frozen sweet dough[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(3): 538–544.
- [22] Silvas Garcia M I, Ramirez Wong B, Torres Chavez P I, et al. Physicochemical changes in frozen dough and the effect on bread quality: a review[J]. *Interciencia*, 2013, 38(5): 332–338.
- [23] Zhao L, Li L, Liu G Q, et al. Effect of freeze – thaw cycles on the molecular weight and size distribution of gluten[J]. *Food Research International*, 2013, 53(1): 409–416.
- [24] Wang P, Chen H Y, Mohanad Bashari, et al. Effect of frozen storage on physico – chemistry of wheat glute proteins; Studies on gluten – , glutenin – and gliadin – rich fractions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 38: 187–194.
- [25] 刘国琴, 阎乃珺, 赵雷, 等. 冻藏对面筋蛋白二级结构的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012(5): 115–120.
- [26] 赵雷, 于亚楠, 胡卓炎, 等. 恒温冻藏对面筋蛋白结构及热力学特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2016(5): 161–166+78.
- [27] L Abadía – García, E Castaño – Tostado, L Ozimek, et al. Impact of ultrasound pretreatment on whey protein hydrolysis by vegetable proteases [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37: 84–90.
- [28] Jambrak A R, Mason T J, Lelas V, et al. Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121: 15–23.
- [29] O’Sullivan J, Murray B, Flynn C, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 141–154.
- [30] Arzeni C, Martinez K, Zema P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(3): 463–472.
- [31] O’Sullivan J, Arellano M, Pichot R, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of dairy proteins [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 42: 386–396.
- [32] 黄达伟, 马宁, 杜喜坤. 超声对小麦面筋蛋白功能性质的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2014(3): 42–45.
- [33] 李诚, 郑志, 罗水忠, 等. 挤压操作参数对组织化小麦蛋白复水性影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2016(6): 35–40.
- [34] 马宁, 朱科学, 郭晓娜, 等. 挤压组织化对小麦面筋蛋白结构影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013(1): 60–64.
- [35] Pietsch V L, Emin M A, Schuchmann H P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 198: 28–35.
- [36] Martínez M, Oliete B, Gómez M. Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality [J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 424–429.
- [37] 张海华, 朱科学, 陈晔, 等. 微波处理对小麦面筋蛋白结构的影响[J]. *食品科学*, 2011(5): 65–69.
- [38] 刘国琴, 阎乃珺, 陈璐瑶. 动态高压微射流对小麦面筋蛋白功能性质影响的研究[J]. *现代食品科技*, 2013(5): 936–940.
- [39] 任仙娥, 杨锋, 曹燕, 等. 糖基化改性对谷朊粉功能性质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2013(4): 30–33.
- [40] 张利兵, 赵妍嫣, 姜绍通. 小麦醇溶蛋白磷酸化改性工艺及性质的研究[J]. *食品工业科技*, 2012(12): 318–321.
- [41] 廖兰, 韩雪跃, 李章发, 等. 脱酰胺作用对降解小麦面筋蛋白特性的研究[J]. *现代食品科技*, 2015(1): 21–25.
- [42] 孟丹阳, 赵伟, 杨瑞金, 等. 小麦面筋蛋白酶解过程中功能性质的变化规律研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5): 115–119.
- [43] Li Y, Yu J, Goktepe I, et al. The potential of papain and alcalase enzymes and process optimizations to reduce allergenic gliadins in wheat flour [J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 1338–1345.
- [44] Amiri A, Shahedi M, Kadivar M. Evaluation of physicochemical properties of gluten modified by Glucose oxidase and Xylanase [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 71: 37–42.
- [45] 王凯强, 黎敏, 罗水忠, 等. 酶法复合改性对小麦面筋蛋白性质和结构的影响[J]. *现代食品科技*, 2016(3): 177–182+280.
- [46] 孙婕, 尹国友, 李青松, 等. 复合酶法制备小麦面筋蛋白多肽及其抗氧化活性研究[J]. *粮油食品科技*, 2014(2): 95–99.
- [47] 赵谋明, 邹晶, 赵亚琦, 等. 脱酰胺与双酶协同作用提高小麦面筋蛋白酶解效率[J]. *农业工程学报*, 2016(23): 303–308.
- [48] 李娟, 刘国琴, 陈洁. 壳聚糖—醋酸改性对小麦面筋蛋白溶解度的影响及蛋白质二级结构的分析研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2012(5): 15–20.
- [49] 邵平, 孙培龙, 孟祥河, 等. 琥珀酰化和蛋白酶改性对小麦面筋蛋白功能性质的影响[J]. *核农学报*, 2007(3): 268–272.
- [50] 周非白, 廖兰, 赵谋明. 超声处理对脱酰胺改性后的小麦面筋蛋白功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2011(16): 157–161.
- [51] 臧艳妮, 赵妍嫣, 罗水忠, 等. 超声波和糖基化复合改性对小麦面筋蛋白性质和结构的影响[J]. *食品科学*, 2016: 1–9.
- [52] 任志强, 肖建红, 杨慧珍, 等. 转基因植物在农业上的应用[J]. *安徽农业科学*, 2016(3): 109–110. 