

酶法改性对麦麸膳食纤维及面团品质的影响

许锐, 李 闻, 秦韶爽, 李 明, 郭波莉*, 张影全

(中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部粮油加工综合利用技术集成实验室 北京 100193)

摘要 麦麸来源广泛且富含多种营养物质,对人体健康有益。将麦麸加入面粉后制成全麦产品,存在适口性差,消费者接受度低的问题,不利于其在食品体系中营养功能的发挥。为扩大麦麸的应用范围,可通过使用特定的酶修饰麦麸结构,提高可溶性膳食纤维(SDF)含量,改善其物理化学性质,提高麦麸的经济价值。本文对可用于麦麸膳食纤维(DF)改性的酶的种类,改性前、后 DF 化学结构(分子质量、支化度及阿魏酸)和理化性质(持水性、吸水性、黏度、溶解性、交联性)变化及改性麦麸对面团水分分布状态、流变学特性、热特性、面筋网络结构及淀粉的糊化与回生等的影响进行归纳和总结,揭示膳食纤维结构变化对麦麸及面团品质的影响,以期酶法改性麦麸在全麦制品中的应用提供参考。

关键词 酶法改性; 阿拉伯木聚糖; 结构; 理化特性; 面团

文章编号 1009-7848(2024)10-0460-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.042

小麦在国民饮食生活中占有重要地位^[1]。除蛋白质和淀粉外,小麦还富含膳食纤维(Dietary fiber, DF)(10.2%)、维生素(2.53%)、矿物质(1.8%)^[2]、酚类化合物(0.17%)^[3]等多种活性成分。其中,膳食纤维被称为人类的“第七大营养素”,具有降血糖^[4]、降血压^[5]、降血脂^[6],改善肠道菌群和预防结肠癌^[7]等生理功效,其主要存在于麦麸中,约占麦麸总质量的 35%~50%^[8]。麦麸中的 DF 主要是阿拉伯木聚糖(Arabinoxylan, AX)和 β -葡聚糖(β -Glucan, BG),其中 AX 占 DF 总量的 70%^[9]。根据溶解性,AX 可分为水溶性阿拉伯木聚糖(Water-extractable arabinoxylan, WEAX)和水不溶性阿拉伯木聚糖(Water-unextractable arabinoxylan, WUAX),其中 WUAX 占 70%~75%^[10]。研究表明,WUAX 会与面筋蛋白竞争吸水,干扰面筋网络的形成并破坏面团结构,在面筋网络的发展过程中阻碍 CO₂ 气体进入,导致全麦食品质地粗糙、外观不良^[11],严重影响其在食品工业中的应用。与 WUAX 相比,WEAX 的分子质量以及侧链上阿拉伯糖的支化度更低,WEAX 能够促进面筋蛋白热聚集,增加面团吸水率,提高面团混合稳定性,增加面包体积^[12],对面团和面制品的品质产生

积极影响^[13]。BG 约占麦麸 DF 的 6%^[9],与 AX 类似,不同结构的 BG 对面团品质产生不同的影响。其中,高分子质量的 BG 遇水形成高黏性凝胶,附着在面筋网络结构表面,影响面筋网络的形成和稳定性^[14],而较低分子质量的 BG 水溶性较高,添加到低筋面粉中会改善面团的流变学特性,达到与高筋粉类似的效果^[15]。为改变麦麸 DF 的结构,提高其溶解性,减弱其对面团及面筋网络结构的破坏,提升全麦制品品质,需对麸皮做改性处理。

常用于麦麸改性的方法有化学法、物理法和生物法(酶法和发酵法)。其中,酶法改性通过破坏麦麸不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)结构中的糖苷键来减小分子间的聚合,使其粒径减小,质地松散,释放可溶性小分子,同时亲水官能团暴露,易与水分子形成氢键,从而提高 DF 溶解性^[16]。相比于其它改性方法,酶制剂具有催化效率高,专一性强的优点;同时,酶制剂无毒、无污染,绿色环保,可广泛用于食品行业。

本文对几种广泛应用于麦麸 DF 改性的酶制剂以及酶联合物理改性方法进行归纳和总结,对改性后由 AX 结构(分子质量、支化度及阿魏酸含量)变化引起的理化性质变化进行分析,探讨麦麸改性前、后对面团水分分布状态、流变学特性、热特性、面筋网络结构及淀粉糊化和老化的影响,旨在阐明麦麸 DF 恶化面制品品质及酶改性麦麸提升面制品品质的作用机制,以期酶法改性麦麸 DF 的规模化生产和深度开发利用提供理论依据。

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2022YFF1100502-3)

第一作者: 许锐,女,硕士生

通信作者: 郭波莉 E-mail: guoboli2007@126.com

1 酶法改性麦麸的研究现状

麦麸是指包裹胚芽和胚乳的小麦籽粒的外层表皮,主要由果皮、外种皮、珠心表皮和糊粉层组成,约占小麦籽粒质量的 13%~17%,如图 1 所示^[17],包括纤维素(6.5%~9.9%)、半纤维素(20.8%~33%)和木质素(2.2%~9%)^[3]。其中,AX 和 BG 均属于半纤维素。AX 是由 *D*-吡喃木糖残基以 β -1,4 糖苷键连接而成的木聚糖为主链,木聚糖主链的 O-2 或 O-3 位可以被阿拉伯糖所取代,同时在某些阿拉伯糖侧链上存在与酯键相连的葡萄糖醛酸、阿魏酸(Ferulic acid, FA)等物质^[18];BG 是由 β -*D*-吡喃葡萄糖基通过 β -(1 \rightarrow 3)和(1 \rightarrow 4)糖苷键连接成的线性同聚多糖^[19]。常用于麦麸改性的酶制剂是纤维素酶和半纤维素酶(主要为木聚糖酶)。同时,木质素酶能够氧化木质素产生自由基,这些自由基通过去甲氧基、脱羧基和 C-C 链断裂等方式,最终使得木质素大分子解聚,从而使位于 DF 内部的纤维素和贯穿于纤维素长链中的半纤维素暴露,利于纤维素酶和半纤维素酶发挥作用。

1.1 纤维素酶

常用于麦麸改性的纤维素酶主要是内切葡聚糖酶(E.C.3.2.1.4, C1 酶)和 β -葡萄糖苷酶(E.C.3.2.1.21, BGL 酶)^[21-22]。C1 酶主要作用于纤维素分子链内部的非结晶区,可以切断纤维素分子内部任

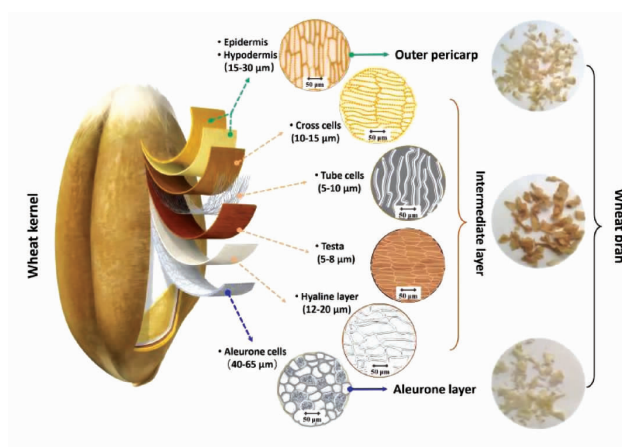


图 1 麦麸结构示意图^[20]

Fig.1 Schematic diagram of wheat bran^[20]

意位置 β -1,4 糖苷键,将大分子纤维素切割成短链小分子纤维素并产生自由还原端;BGL 酶作用于纤维素分子非还原性末端的 β -*D*-葡萄糖苷键,将产生的小分子纤维素水解为葡萄糖^[16]。Nguyen 等^[23]采用纤维素酶处理麦麸以提高 IDF 向 SDF 转化的比例,与未处理的麦麸相比,在最佳改性条件下,麦麸中 IDF/SDF 的比例降低 42%。索江华等^[24]为了提高纤维素酶对麦麸的酶解效率,通过单因素和响应面试验优化反应条件,在最佳反应条件下,纤维素转化为可溶性糖的含量提高了 2 倍。

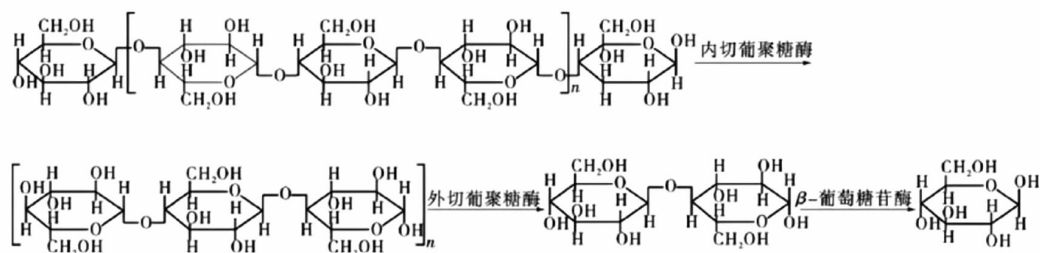


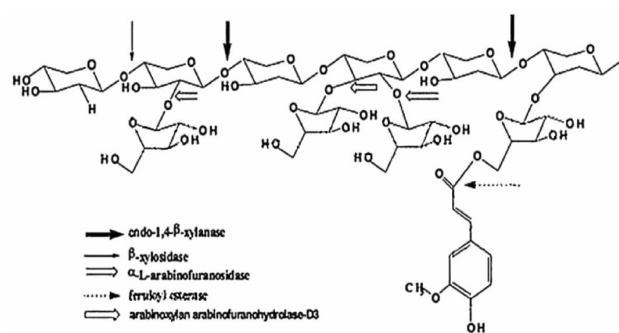
图 2 纤维素被纤维素酶组分协同水解机制^[25]

Fig.2 The mechanism of cellulose hydrolyzed by cellulases^[25]

1.2 木聚糖酶

木聚糖酶在麦麸改性中的应用最为广泛^[26],主要包括内切 β -1,4-*D*-木聚糖酶(EC3.2.1.8)、 β -*D*-木糖苷酶(EC3.2.1.37)、 α -*L*-阿拉伯糖苷酶(EC3.2.1.55)、乙酰基木聚糖酯酶(EC3.1.1.72)和阿魏酸酯酶(EC3.1.1.73)^[27]。内切 β -1,4-*D*-木聚糖酶作用于麦麸 AX 主链的 β -1,4 糖苷键; β -*D*-

木糖苷酶以外切方式从非还原性末端水解低聚木糖; α -*L*-阿拉伯糖苷酶作用于 AX 侧链中的阿拉伯糖与木糖残基之间的糖苷键;乙酰基木聚糖酯酶、阿魏酸酯酶分别作用于乙酰基、阿魏酰基团与阿拉伯糖残基之间的酯键,水解产生游离乙酸、阿魏酸。张书静等^[28]采用木聚糖酶对麦麸半固态酶解,在最佳改性条件下,麦麸 SDF 的含量为 6.01%,

图3 AX被木聚糖酶组分协同水解机制^[10]Fig.3 The mechanism of AX hydrolyzed by xylanases^[10]

SDF在总膳食纤维中的占比从8.1%提高到16.6%。Xue等^[29]采用内切木聚糖酶和阿拉伯糖苷酶对麦麸酶促水解,与单酶处理相比,两种酶结合处理可以显著提高AX的水解度,增加可溶性低聚木糖的含量。Wu等^[30]采用木聚糖酶和阿魏酸酯酶高效降解麦麸,在酶添加量最佳水平条件下,FA释放比例增加到70%(单独作用的单个酶释放16.8%),低聚木糖的产量是单一酶作用下的两倍。

1.3 木质素酶

木质素经木质素过氧化物酶的氧化作用产生自由基,然后再进行一系列酶解反应将木质素聚合体中的C-C键和醚键氧化断裂,从而降低木质素的稳定性。木质素过氧化物酶可使麦麸表皮细胞壁结构更松散,暴露纤维素酶和木聚糖酶作用位点,从而提高麦麸SDF含量。徐安民^[31]用白腐菌发酵产生的木质素酶对麦麸改性,在最优酶解条件下,麦麸中木质素的降解率达36.24%,是未改性的1.9倍。尽管木质素酶可以降解木质素提高SDF含量,但目前多集中于农副产品秸秆的饲料、造纸工业中生物漂白及废水处理等,在食品工业中的应用相对较少。为了促进其更好的利用,可以将木质素酶与纤维素酶或木聚糖酶联合使用,以更好发挥酶的协同作用,提高改性效率。

1.4 复合酶

使用2种或2种以上的酶对麦麸改性,可以发挥不同酶之间的协同效应,提高酶解效率和麦麸品质。李玉忠等^[32]比较了纤维素酶和木聚糖酶单独及联合使用对麦麸酶解的效果,在最佳改性条件下,联合酶解后的麦麸变得更加细腻,适口性提高。Zhang等^[33]以麦麸为原料,添加纤维素酶和

木聚糖酶对其酶解,复配比为1:1,在55℃,pH 5.0条件下,酶解2h后,得到的麦麸结构变得松散,出现较多裂缝,理化性质也明显改善。联合酶改性效果优于单一酶是由于木聚糖酶促使木聚糖的重新排列,可以促进纤维素酶作用位点的暴露,增大与底物的接触面积,从而提高酶解效率。此外,也有研究表明木质素酶通过水解木质素将其与纤维素分离,降低木质素对纤维素酶的抑制作用,提高纤维素酶的酶解效率,使IDF转化为SDF^[34]。

1.5 酶-物理

借助高温、高压、高剪切力等物理作用使麦麸细胞壁破裂,结构松散,化学键断裂,暴露出更多位点,易与酶制剂结合,因此,物理方法和酶联合对麦麸改性通常比单一酶处理的效果更为显著。目前,用于膳食纤维改性的物理技术包括超声、微波、挤压、超微粉碎、高压均质、蒸汽爆破、高静水压等。其中,超声、微波及挤压3种技术常与酶法联合使用。吕春月等^[35]对比了微波、酶解、微波联合酶解3种方式对麦麸结构和性质的影响,联合改性的麦麸结构更加疏松,在最佳工艺条件下,麸皮中的IDF含量从11.58%降低至2.79%,还原糖含量从0.8 mg/mL增加至25.15 mg/mL。Zhang等^[36]研究发现挤压结合半固态酶解联合改性后,麦麸结构变得更加松散,改性后麦麸中SDF的比例从3.3%提高到8.1%,SDF占总DF的比例从6.2%增加到16.4%。

目前可用于麦麸膳食纤维改性的酶的种类有很多,而这些酶制剂仅针对其中某一位点,缺乏对麦麸膳食纤维改性的专用酶制剂。未来可以针对麦麸膳食纤维及现有酶的结构特点,开发对麦麸改性的专用酶制剂,以此提高改性效率。

2 酶法改性麦麸结构及理化性质研究

2.1 吸水性

DF因含有大量亲水基团如羟基、羧基等,表现出强吸水性。研究发现AX的吸水能力为自身质量的10倍左右,且WUAX的吸水能力大于WEAX的吸水能力^[37]。研究表明,AX的吸水性与其分子质量、支化度有关。Zhang等^[38]的研究发现在高相对湿度情况下,高支化度的AX比用 α -阿拉

表 1 应用于麦麸 DF 改性的酶制剂
Table 1 Enzymes used in wheat bran modification

酶		作用位点	产物	结构特点
纤维素酶	内切葡聚糖酶	任意 β -1,4-糖苷键	短链小分子纤维	降低葡聚糖的聚合度,产物带大量非还原性末端
	β -葡萄糖苷酶	非还原末端的 β -D-葡萄糖苷键	葡萄糖	自身底物低聚葡萄糖及产物葡萄糖积累,会抑制 β -葡萄糖苷酶发挥作用
木聚糖酶	内切木聚糖酶 (主要包括 GH10 和 GH11 两个族)	AX 主链的 β -1,4 糖苷键	低聚木糖或带有侧链的寡聚糖	降低木聚糖的聚合度;GH10 降解 WEAX 产生较高取代度和较小分子质量的 AX;GH11 降解 WUAX 产生较小分支度的 WEAX
	β -D-木糖苷酶	非还原末端的 β -1,4 糖苷键	木糖和低聚糖	提高内切木聚糖酶降解效率,加速木聚糖的降解
	α -L-阿拉伯呋喃糖苷酶	木聚糖 C2 或 C3 位与阿拉伯糖相连的糖苷键	侧链上的阿拉伯糖和木聚糖主链	降低 AX 的支化度
	乙酰基木聚糖酯酶	乙酰化木聚糖中木糖残基 C2 或 C3 位上与 O-乙酰基相连的酯键	侧链上的乙酸和木聚糖	乙酸的释放可以增加内切木聚糖酶作用于主链的位点
	阿魏酸酯酶	阿拉伯糖 C5 位与阿魏酸相连的酯键	侧链上的阿魏酸和木聚糖	FA 的释放可以提高纤维素酶或木聚糖酶降解主链的效率

伯糖苷酶酶解的低支化度的 AX 显示出更高的吸水性。

2.2 持水性

DF 因具有多孔的物理结构和丰富的侧链羟基而表现出较强的持水能力,持水量约为自身质量的 1.5~25 倍^[39]。酶法改性后的 DF 具有更大的比表面积和更多孔的疏松结构,持水能力上升。Kaur 等^[38]研究发现 DF 的持水性主要与 AX 的支化度及多孔的结构有关,孔径越大,分支结构越多,持水性越高。

2.3 黏度

麦麸经酶法改性后,糖苷键断裂导致溶液黏度升高或下降。研究表明 AX 的黏度与分子质量、支化度及阿魏酸(FA)含量有关。改性后 AX 的分子质量及支化度减小,导致溶液黏度下降,而 FA 含量增加又导致黏度升高。研究发现采用酶去除阿拉伯糖基侧链后,阿拉伯糖减少导致 AX 支化度降低,溶液黏度明显下降^[41]。Xiao 等^[42]通过自由基接枝反应调整 AX 侧链上 FA 含量,结果显示 AX 的黏度随 FA 含量的增加呈上升趋势。同时 Yan 等^[43]研究发现具有较高分子质量的 AX 也会

表现出较高的黏度。此外,改性后 SDF 浓度增加导致多糖黏度增加^[44]。张洪微等^[45]采用纤维素酶解、挤压-纤维素酶解对麦麸改性处理,相比于未改性麦麸,改性后麦麸 SDF 含量增加且黏度升高。

2.4 溶解性

研究表明 AX 的溶解性与分子质量及侧链基团数量有关,当分子质量相同时,分子中侧链越多,溶解度越大;当分子质量不同时,分子量质越小,AX 溶解度越大^[46]。陶颜娟^[47]采用纤维素酶和木聚糖酶水解麦麸发现木聚糖酶改性得到的 SDF 中 AX 的支化度高于纤维素酶,导致 DF 的溶解度增加。Andersson 等^[48]采用 3 种内切木聚糖酶处理麦麸,发现其中一种木聚糖酶所得 AX 的分子质量较大,导致仅能溶解小部分 AX。除了分子质量和支化度,AX 的溶解性还与分子内及分子间的非共价键有关。经酶法改性后,AX 通过分子内羟基、酯键或醚键与水分子形成氢键进而提高溶解性。此外,AX 与麦麸中的纤维素、木质素等产生共价交联作用也会影响溶解性^[49]。

2.5 氧化交联性

AX 的氧化交联性是指 AX 在与某些化学氧

化剂或氧化酶共存的情况下,分子间发生相互交联形成三维网状凝胶结构。AX 分子质量、支化度及 FA 含量均会影响氧化交联性,FA 通过形成二聚体或三聚体促进氧化交联体系的形成。Han 等^[50]比较了 3 种小麦品种来源的 AX 的凝胶特性,结果显示高分子质量和高 FA 含量的 AX 显示出较高的氧化交联度,可以形成具有更大弹性质地的交联水凝胶。Wang 等^[51]的研究成果表明较低支化度的 AX 有利于凝胶结构的形成。Izydorczyk 等^[52]研究表明 AX 的主链分子质量越高,取代程度越低,所形成的凝胶网络结构越强。

3 酶法改性麦麸对面团品质影响的研究

3.1 水分分布状态

DF 因含有的羟基等亲水基团对水分的争夺及其与大分子之间的相互作用,造成面团中的水分向游离态迁移,使得面团中的水分分布发生变化。而经酶或其它物理法改性后的麦麸,因 SDF 含量增加缓解了麦麸对面团的劣化作用,使面团中的水分向结合态迁移,面团中结合水含量增加。张书静^[53]采用低场核磁共振技术测定了麦麸改性前、后面团中的水分变化。与普通面团相比,加入麦麸后面团中的强结合水向弱结合水和自由水迁移,而经改性后面团中水分向结合态迁移,面团中结合水含量增加。与此类似,Meng 等^[54]也采用低场核磁共振技术研究了经不同改性后的黑小麦全麦面团的水分分布变化,与黑小麦面团相比,经物理及酶解制备的全麦面团的强结合水比例(A_{21})增加,弱结合水比例(A_{22})减小。此外,DF 分子结构变化也会引起水分的重新分布,如低含量的 FA 通过降低 AX 的凝胶性削弱麦麸与面筋蛋白竞争吸水的能力,使得本来与 AX 结合的水分迁移到面筋蛋白中去^[55];高分子质量(3.23×10^5 u)的 AX 能够增加面团的横向弛豫时间(T_2),而低分子质量的 AX (1.14×10^4 u)能降低面团弱结合水和自由水的弛豫时间(T_{21} 和 T_{22})^[56]。

3.2 面团流变学特性

DF 因具有较强的吸水性,加入面粉后可显著提高面团的吸水率,改变面团的形成时间和稳定时间,对面团的流变学性质造成不良影响。而经过改性的麦麸由于 SDF 含量增加及 AX 分子结构改

变,麦麸与面筋蛋白竞争吸水能力下降,面筋蛋白能够充分吸水,使得面团形成时间下降,稳定时间延长,筋力增强,延伸性增加,面团流变学性质得到改善。Guo 等^[56]通过对比未经酶解及内切木聚糖酶改性的 AX 对面团品质的影响发现,与未改性的高分子质量 AX 相比,改性后低分子质量的 AX 能够增加面团的稳定时间,降低衰减值,改善面团流变学特性。Zhang 等^[57]采用微生物发酵及酶水解两种方法对麦麸进行生物改性,与未改性的麦麸相比,改性后的麦麸能够显著降低面团形成时间,提高稳定时间。此外改性后低分子质量、高支化度及高 FA 含量的 AX 可以与面筋蛋白发生相互作用,从而提高面筋的弹性模量(G')和黏性模量(G''),增加面团的黏弹性^[58-59]。

3.3 热特性

面团热特性可以反映面筋蛋白的热稳定性,而热稳定性是影响面筋网络强弱的重要因素。DF 与面筋蛋白竞争吸水,面筋蛋白内部疏水基团暴露,使得面筋蛋白从有序态变为无序态、从折叠态变为展开态,进而导致面筋网络结构展开,而面筋网络结构的变化引起蛋白质内部肽键、二硫键以及 O-N 和 O-O 键等化学键的断裂,分子链解聚,使得面筋蛋白热变性温度(T_p)和热变性焓值(ΔH)下降,进而影响面团的热稳定性^[60]。Ma 等^[61]的研究结果表明未经改性的麦麸 DF 会引起谷蛋白表面疏水性和游离巯基含量的增加,使得其降解温度(T_d)下降,进而影响面筋蛋白的热稳定性。而经改性的麦麸 DF 分子质量下降,分子链柔性降低使其自我交联能力减弱,易与面筋蛋白发生相互作用,使得面团热稳定性升高。

3.4 面筋网络结构

麦谷蛋白和麦醇溶蛋白是小麦面筋蛋白的主要组成成分,两者通过分子间氢键、二硫键及其它相互作用力形成了具有特殊黏弹性的网状结构即面筋网络结构^[62]。DF 由于颗粒状的结构加入面粉后会剪切和稀释面筋蛋白,致使其表面出现孔洞且分布不均匀。且面筋蛋白中二硫键含量下降,二级结构中 β -折叠减少,无规则卷曲、 α -螺旋和 β -转角含量增加,影响面筋网络的连续性和稳定性。而经改性后的 DF 粒度减小,缓解了对面筋蛋白的剪切,虽面筋表面结构略有粗糙,但气孔大小和

结构分布较均匀^[63]。此外,改性后 DF 分子结构变化也会改善面筋网络结构,如改性后 DF 中的 FA 被释放,活性双键暴露,可与面筋蛋白质结合成更大分子的网络结构;同时改性后低分子质量的 AX 能够促进更紧密和更连续的蛋白质网络的形成,有利于面筋网络的维持。

3.5 淀粉糊化与回生

淀粉作为面制品中的主要成分,其糊化和老化过程能够预测产品品质^[64]和货架期。研究表明 IDF 会破坏直链淀粉结构,增大淀粉膨胀程度,使糊化黏度升高^[65]。此外,DF 因含有大量亲水基团可与直链淀粉分子发生相互作用,形成稳定的凝胶网络结构,阻碍淀粉分子间的相互作用,扰乱淀粉分子的有序排列,增加淀粉糊化难度,降低老化程度^[66-68]。研究表明,当 WEAX 支化度相同时,分子质量越低,对淀粉糊化的抑制作用更明显。此外低分子质量的 WEAX 通过抑制直链淀粉的重结晶可以有效抑制短期回生。而高分子质量的 WEAX 通过阻碍支链淀粉的重结晶可以显著抑制支链淀粉的长期回生^[69]。Hou 等^[70]的研究发现较大分子质量和较高支化度的 WBAX 可以阻碍小麦淀粉糊化过程。而较低支化度 WBAX 由于与淀粉之间的氢键相互作用可以通过阻碍支链淀粉的重排和直链淀粉在长期储存过程中的双螺旋缔合,从而抑制淀粉的长期回生。

4 结论与展望

酶制剂通过切断麦麸 DF 中 AX、BG 等大分子物质不同部位间的糖苷键,来改变其结构和理化性质,增加 SDF 含量以减弱对面团品质的劣变,改善全麦制品适口性差的缺陷。经不同的酶和酶-物理联合改性的麦麸糖苷键断裂,产生不同分子质量、支化度及 FA 含量的 AX,导致 DF 的持水性、吸水性、溶解性、黏度及氧化交联性等发生改变,回添入面粉后进一步影响面团的水分分布、流变学特性、面筋网络结构、热特性及淀粉的糊化与回生。目前,关于改性麦麸在改善全麦产品品质方面已开展了诸多研究,并取得了一些研究结果,然而仍存在以下几个方面的问题:1)DF 结构复杂且多样,使用复合酶制剂对麦麸进行改性,导致改性后麦麸 DF 的结构和理化特性差异较大,如何分

离提取不同结构和理化特性的 DF,以及其有何具体用途还不明确;2)可用于麦麸膳食纤维改性的酶的种类有很多,然而不同酶制剂对麦麸改性的有效性及机理还不清楚;3)酶法改性对麦麸 SDF 有一定的提高,在一定程度上提高了麦麸的添加量,并改善了面制品品质,然而与全谷物食品中要求的膳食纤维含量还有很大差距,且口感、操作性能还无法满足全谷物食品加工工业化的要求。因此,亟需加强不同改性技术对麦麸结构及理化性质的研究;同时要深入研究改性麦麸结构对面团不同组分的影响,如 DF 与谷蛋白、醇溶蛋白、直链淀粉及支链淀粉互作机理,为开发口感优良的全麦制品,促进我国全谷物产业的发展提供指导。

参 考 文 献

- [1] LIU Y Y, YU J, ZHANG L, et al. Effects of fertilization on yield and nitrogen use efficiency of wheat and rice with straw return[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(10): 1161-1170.
- [2] 温纪平, 郭林桦, 丁兴丽, 等. 全麦粉的生产技术研究进展[J]. *食品科技*, 2013, 38(7): 183-186.
WEN J P, GUO L Y, DING X L, et al. Progress in the production of whole wheat flour[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(7): 183-186.
- [3] CHEN W, SUN Y J, FAN M C, et al. Wheat bran, as the resource of dietary fiber: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 62(26): 7269-7281.
- [4] GIUNTINI E B, SARDÁ F A, DE MENEZES E W. The effects of soluble dietary fibers on glycemic response: An overview and futures perspectives[J]. *Foods*, 2022, 11(23): 3934.
- [5] ALEIXANDRE A, MIGUEL M. Dietary fiber and blood pressure control[J]. *Food & Function*, 2016, 7(4): 1864-1871.
- [6] SOLIMAN G A. Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease[J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1155.
- [7] CRONIN P, JOYCE S A, O'TOOLE P W, et al. Dietary fiber modulates the gut microbiota [J]. *Nutrients*, 2021, 13(5): 1655.
- [8] 李静. 麦麸营养成分的提取与应用研究进展[J]. *现代*

- 面粉工业, 2022, 36(2): 14–18.
- LI J. Research progress on extraction and application of nutritional components of wheat bran[J]. Modern Flour Milling Industry, 2022, 36(2): 14–18.
- [9] HELL J, KNEIFEL W, ROSENAU T, et al. Analytical techniques for the elucidation of wheat bran constituents and their structural features with emphasis on dietary fiber – A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(2): 102–113.
- [10] 孙念霞. 酶法改性对阿拉伯木聚糖及全麦制品益生活性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- SUN N X. Effect of enzymatic modification on the prebiotic activity of arabinoxylan and whole wheat product[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural, 2019.
- [11] 李凡, 李言, 钱海峰, 等. 阿拉伯木聚糖提取及其对面团性质影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(6): 194–202.
- LI F, LI Y, QIAN H F, et al. Research progress on extraction of arabinoxylan and its effects on dough[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2022, 37(6): 194–202.
- [12] MOON Y, JEON S, HONG Y E, et al. Quality of commercial korean domestic wheat flours and their dry noodle-making performance[J]. Korean Journal of Food and Cookery Science, 2018, 34(4): 366–374.
- [13] MA S, WANG Z, LIU H M, et al. Supplementation of wheat flour products with wheat bran dietary fiber: Purpose, mechanisms, and challenges [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 281–289.
- [14] 董吉林, 朱莹莹, 申瑞玲. 全谷物膳食纤维对小麦面团及其主要组分的影响研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(5): 1–8.
- DONG J L, ZHU Y Y, SHEN R L. Research progress in the effects of whole grain dietary fiber on wheat dough and its main component[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(5): 1–8.
- [15] SKENDI A, BILIADERIS C G, PAPAGEORGIOU M, et al. Effects of two barley β -glucan isolates on wheat flour dough and bread properties [J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 1159–1167.
- [16] 张帅, 郭晓雪, 任丽琨, 等. 酶法改性影响膳食纤维的构成及生物作用效果的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1089–1098.
- ZHANG S, GUO X X, REN L K, et al. Research progress of enzymatic modification on the composition and biological effects of dietary fiber[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(4): 1089–1098.
- [17] 陈雅洁. 加工对麦麸理化性质和益生特性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- CHEN Y J. Effect of processing on physicochemical properties and probiotics of wheat bran[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [18] 司晓静. 阿拉伯木聚糖及其酶解物影响面筋蛋白热诱导聚集的机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- SI X J. Study on the mechanism of effect of arabinoxylan and its hydrolysates on heat-induced aggregation of gluten[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [19] 申瑞玲. 燕麦 β -葡聚糖的提取纯化及功能特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- SHEN R L. Study on the extraction, purification and characterization of oat β -glucan[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005.
- [20] CHEN Z W, MENSE A L, BREWER L R, et al. Wheat bran layers: Composition, structure, fractionation, and potential uses in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(19): 6636–6659.
- [21] 何芳芳, 王海军, 王雪莹. 纤维素酶的研究进展[J]. 造纸科学与技术, 2020, 39(4): 1–8.
- HE F F, WANG H J, WANG X Y. Research progress of cellulase[J]. Paper Science and Technology, 2020, 39(4): 1–8.
- [22] ASZTALOS A, DANIELS M, SETHI A, et al. A coarse-grained model for synergistic action of multiple enzymes on cellulose[J]. Biotechnology for Biofuels, 2012, 5(1): 55.
- [23] NGUYEN S N, VIEN M D, LE T T T, et al. Effects of enzymatic treatment conditions on dietary fibre content of wheat bran and use of cellulase-treated bran in cookie [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(8): 4017–4025.
- [24] 索江华, 唐桂芬, 黄锋, 等. 复合纤维素酶对小麦麸降解条件的优化[J]. 现代牧业, 2022, 6(2): 19–24.
- SUO J H, TANG G F, HUANG F, et al. Optimization of degradation conditions of wheat bran by compound cellulase [J]. Modern Animal Husbandry, 2022, 6(2): 19–24.
- [25] 美合热阿依·木台力甫, 凯迪日耶·玉苏普, 王继莲.

- 微生物来源纤维素酶的工业应用进展[J]. 农产品加工, 2021(16): 60–62, 8.
- MEI H R A Y·M, KAI D R Y·Y, WANG J L. Research progress in the application of cellulase[J]. Farm Products Processing, 2021(16): 60–62, 8.
- [26] 陈洪洋, 蔡俊, 林建国, 等. 木聚糖酶的研究进展[J]. 中国酿造, 2016, 35(11): 1–6.
- CHEN H Y, CAI J, LIN J G, et al. Research progress of xylanase[J]. China Brewing, 2016, 35(11): 1–6.
- [27] 高雅君, 丁长河. 木聚糖酶在食品工业中的应用研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(2): 32–36.
- GAO Y J, DING C H. Research progress on the application of xylanase in food industry[J]. Cereal and Food Industry, 2017, 24(2): 32–36.
- [28] 张书静, 潘芹敏, 贾喜午, 等. 半固态酶解法改性麦麸的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(12): 107–113.
- ZHANG S J, PAN Q M, JIA X W, et al. Process optimition of modified wheat bran by semi-solid enzymatic hydrolysis[J]. Food Research and Development, 2022, 43(12): 107–113.
- [29] XUE Y M, CUI X B, ZHANG Z H, et al. Effect of β -endoxylanase and α -arabinofuranosidase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans[J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125332.
- [30] WU H L, LI H L, XUE Y, et al. High efficiency co-production of ferulic acid and xylooligosaccharides from wheat bran by recombinant xylanase and feruloyl esterase[J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 120: 41–48.
- [31] 徐安民. 高效木质素降解白腐菌发酵麦麸对面条品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- XU A M. High efficiency lignin degradation and effect of wheat bran fermented by white rot fungus on the quality of noodle[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [32] 李玉忠, 路宏科, 陈兴叶, 等. 利用生物酶解技术提高小麦麸皮食用性的研究[J]. 价值工程, 2014, 33(11): 301–303.
- LI Y Z, LU H K, CHEN X Y, et al. Research on using bio-enzymolysis techniques to enhance the edibility of wheat bran[J]. Value Engineering, 2014, 33(11): 301–303.
- [33] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124983.
- [34] DOS SANTOS A C, XIMENES E, KIM Y, et al. Lignin-enzyme Interactions in the hydrolysis of lignocellulosic biomass[J]. Trends in Biotechnology, 2019, 37(5): 518–531.
- [35] 吕春月, 杨庆余, 刘璐, 等. 微波联合酶法对小麦麸皮品质改良及结构特性影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 21–28.
- LV C Y, YANG Q Y, LIU L, et al. Quality improvement and structural characteristics of wheat bran by microwave enzymatic method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 21–28.
- [36] ZHANG S J, JIA X W, XU L N, et al. Effect of extrusion and semi-solid enzymatic hydrolysis modifications on the quality of wheat bran and steamed bread containing bran[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 108: 103577.
- [37] WANG Z, YAN J Y, MA S, et al. Effect of wheat bran dietary fiber on structural properties of wheat starch after synergistic fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190: 86–92.
- [38] KAUR A, SINGH B, YADAV M P, et al. Isolation of arabinoxylan and cellulose-rich arabinoxylan from wheat bran of different varieties and their functionalities[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106287.
- [39] 郑学玲, 蒋清民, 李秀梅, 等. 小麦麸皮戊聚糖理化性质研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006(6): 15–19.
- ZHENG X L, JIANG Q M, LI X M, et al. Physicochemical properties of wheat bran pentosans[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2006(6): 15–19.
- [40] ZHANG Y, PITKÄNEN L, DOUGLADE J, et al. Wheat bran arabinoxylans: Chemical structure and film properties of three isolated fractions[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 852–859.
- [41] 周素梅, 王强, 张晓娜. 小麦中功能性多糖-阿拉伯木聚糖研究进展[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 297–301.
- ZHOU S M, WANG Q, ZHANG X N. Research advances in functional polysaccharide-wheat arabi-

- noxytan[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 297–301.
- [42] XIAO X Y, QIAO J L, WANG J, et al. Grafted ferulic acid dose-dependently enhanced the apparent viscosity and antioxidant activities of arabinoxylan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 128: 107557.
- [43] YAN J X, JIA X, FENG L P, et al. Rheological and emulsifying properties of arabinoxylans from various cereal brans [J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 90: 102844.
- [44] FINCHER G B, STONE B A. Cell walls and their components in cereal grain technology[J]. *Advances in Cereal Science & Technology*, 1986, 8: 207–295.
- [45] 张洪微, 杨铭铎, 樊祥富, 等. 3种改性方法对小麦麸皮膳食纤维结构与性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(12): 12–17.
- ZHANG H W, YANG M D, FAN X F, et al. Effects of three modification methods on the structure and characters of wheat bran dietary fiber[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2016, 31(12): 12–17.
- [46] BENGTSSON S, ÅMAN P. Isolation and chemical characterization of water-soluble arabinoxylans in rye grain[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1990, 12(3): 267–277.
- [47] 陶颜娟. 小麦麸皮膳食纤维的改性及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- TAO Y J. Study on the modification and application of wheat bran fiber[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [48] ANDERSSON R, ELIASSON C, SELENARE M, et al. Effect of endo-xylanase-containing enzyme preparations and laccase on the solubility of rye bran arabinoxylan[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83(7): 617–623.
- [49] CYRAN M R, SNOCHOWSKA K K. Evidence of intermolecular associations of β -glucan and high-molar mass xylan in a hot water extract of raw oat groat[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118463.
- [50] HAN K X, GAO J B, WEI W, et al. Laccase-induced wheat bran arabinoxylan hydrogels from different wheat cultivars: Structural, physicochemical, and rheological characteristics [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(3): e16394.
- [51] WANG L B, ZHANG L F, QIU S, et al. Rheological properties and structural characteristics of arabinoxylan hydrogels prepared from three wheat bran sources [J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 88: 79–86.
- [52] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G. Cereal arabinoxylans: Advances in structure and physicochemical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1995, 28(1): 33–48.
- [53] 张书静. 改性麦麸对含麸馒头的影响及其机理探究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- ZHANG S J. Effects of modified wheat bran on bran-containing steamed bread and its mechanism [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.
- [54] MENG X, LI T T, ZHAO J J, et al. Effects of different bran pretreatments on rheological and functional properties of triticale whole-wheat flour [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(3): 576–588.
- [55] 崔西彬. 酶处理麸皮及其在馒头中的应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- CUI X B. Enzyme treatment of bran and its application in steamed bread[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [56] GUO X N, YANG S, ZHU K X. Impact of arabinoxylan with different molecular weight on the thermo-mechanical, rheological, water mobility and microstructural characteristics of wheat dough[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(9): 2150–2158.
- [57] ZHANG H J, ZHANG X S, CAO X R, et al. Semi-solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization[J]. *LWT*, 2018, 98: 306–313.
- [58] WANG P, HOU C D, ZHAO X H, 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 Hydrocolloids*, 2019, 87: 570–581.
- [59] LI W, SUN X Y, DU Y F, et al. Effects of co-fermentation on the release of ferulic acid and the rheological properties of whole wheat dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 111: 103669.
- [60] 黄莲燕. 小麦麸皮物质对面筋网络形成机理影响的研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2018.
- HUANG L Y. Study on the effects of wheat bran fractions on the formation mechanism of gluten pro-

- tein network [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2018.
- [61] MA S, HAN W, LI L, et al. The thermal stability, structural changeability, and aggregability of glutenin and gliadin proteins induced by wheat bran dietary fiber[J]. *Food & Function*, 2019, 10(1): 172–179.
- [62] 张书静, 王展, 沈汪洋, 等. 膳食纤维对面团和筋蛋白影响的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(12): 7–9.
- ZHANG S J, WANG Z, SHEN W Y, et al. Research progress on the effect of dietary fiber on dough and gluten protein[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(12): 7–9.
- [63] LI Q, LIU R, WU T, et al. Interactions between soluble dietary fibers and wheat gluten in dough studied by confocal laser scanning microscopy [J]. *Food Research International*, 2017, 95: 19–27.
- [64] LI M, SUN Q J, HAN C W, et al. Comparative study of the quality characteristics of fresh noodles with regular salt and alkali and the underlying mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 335–342.
- [65] LAI P, LI K Y, LU S, et al. Physicochemical characteristics of rice starch supplemented with dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(1): 153–158.
- [66] 谢新华, 曹芳芳, 仵心军, 等. 小麦纤维对小麦淀粉热力学及流变学特性的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(2): 20–24.
- XIE X H, CAO F F, WU X J, et al. Research on effect of wheat fiber on thermodynamic and rheological properties of wheat starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2019, 34(2): 20–24.
- [67] SANTOS E, ROSELL C M, COLLAR C. Gelatinization and retrogradation kinetics of high-fiber wheat flour blends: A calorimetric approach[J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(4): 455–463.
- [68] 宋欢, 明建, 赵国华. 添加膳食纤维对面团及面制品品质的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 493–496.
- SONG H, MING J, ZHAO G H. Overview on effects of addition of dietary fiber on qualities of dough and products of wheat flour[J]. *Food Science*, 2008, 29(2): 493–496.
- [69] YAN W J, ZHANG M H, ZHANG M, et al. Effect of wheat bran arabinoxylan on the gelatinization and long-term retrogradation behavior of wheat starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119581.
- [70] HOU C D, ZHAO X H, TIAN M Q, et al. Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126477.

Effect of Enzymatic Modification on the Quality of Wheat Bran Dietary Fiber and Dough

Xu Rui, Li Wen, Qin Shaoshuang, Li Ming, Guo Boli*, Zhang Yingquan

(*Institute of Food Science and Technology CAAS, Comprehensive Utilization Laboratory of Cereal and Oil Processing, Ministry of Agriculture and Rural, Beijing 100193*)

Abstract Wheat bran is widely available and rich in a variety of nutrients, which are beneficial to human health. However, adding wheat bran to flour to make whole grain products results in poor palatability and low consumer acceptance, which hinders the utilization of its nutritional functions in the food system. Enzymes are usually used to change wheat brans' structure and increase SDF content to improve physicochemical properties and expand the application of wheat bran and increase its economic interests. In the current review, the types of enzymes, the changes in dietary fiber structure (molecular weight, degree of branching and ferulic acid) and physicochemical properties (water holding capacity, water absorption, viscosity, solubility, crosslinking) before and after modification were summarized firstly. Besides, the effects of modified wheat bran on the water distribution state, rheological properties, thermal properties, gluten network structure, gelatinization, and starch regeneration of dough were also reviewed. The current review reveals the effect of dietary fiber structure changes on wheat bran and dough quality, providing a reference for the application of modified wheat bran in whole wheat products.

Keywords enzymatic modification; arabinoxylan; structure; physicochemical properties; dough