

发酵麦麸及其面包面团中阿拉伯木聚糖溶解性与酚酸释放研究

罗 昆¹, 杨文丹¹, 马子琳¹, 张宾乐¹, 汤晓娟¹, 梁 丽¹, 邹奇波², 郑建仙³, 黄卫宁^{1,*}, Omedi Jacob OJOBI¹
(1.江南大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2.张家港福吉佳食品股份有限公司, 江苏 张家港 215631; 3.华南理工大学食品科学与工程学院, 广州 广东 510641)

摘 要: 将发酵麦麸作为功能配料用于高膳食纤维面包面团制作, 采用化学分析、高效液相色谱及离子色谱法分析麦麸发酵、面包制作过程及面包中阿拉伯木聚糖溶解性和酚类化合物释放。结果表明: 随着发酵时间延长, 麦麸中水溶性阿拉伯木聚糖、游离酚及阿魏酸含量逐渐增加。发酵处理后, 麦麸中游离阿拉伯糖、葡萄糖和果糖含量增加, 水溶性阿拉伯木聚糖含量显著提高, 分支度显著下降 ($P < 0.05$)。面包搅拌、醒发及烘焙过程中, 阿拉伯木聚糖不断溶解, 酚类化合物持续释放; 富含发酵麦麸的面包中水溶性阿拉伯木聚糖含量及分支度更高。模拟肠、胃消化后, 富含发酵麦麸的面包中游离酚和阿魏酸含量更高, 且吸收效果好。此外, 发酵麦麸显著提高了面包的抗氧化活性。

关键词: 麦麸面包; 阿拉伯木聚糖; 酚酸; 体外消化; 抗氧化活性

Araboxylan Solubilization and Phenolic Acid Release from Fermented Wheat Bran and Bread Dough Incorporated with It

LUO Kun¹, YANG Wendan¹, MA Zilin¹, ZHANG Binle¹, TANG Xiaojuan¹, LIANG Li¹, ZOU Qibo², ZHENG Jianxian³,
HUANG Weining^{1,*}, Omedi Jacob OJOBI¹

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Zhangjiagang Fortune Bakery Food Co. Ltd., Zhangjiagang 215631, China;

3. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Fermented wheat bran was used as a functional ingredient to make high dietary fiber bread. Chemical analysis, high performance liquid chromatography and ion chromatography were used to analyze araboxylan solubilization and phenolic acid release during wheat bran fermentation and dough making and from the corresponding bread. The results indicated that the contents of water extractable araboxylan (WEAX), free phenols and ferulic acid in wheat bran increased gradually as fermentation proceeded. After fermentation, the contents of free arabinose, glucose and fructose increased; the content of WEAX improved significantly ($P < 0.05$) whereas the branch degree of WEAX decreased significantly ($P < 0.05$). Araboxylan solubilization and phenol release increased continuously during dough mixing, fermentation and baking; the content and branch degree of WEAX in fermented wheat bran enriched bread were higher. After *in vitro* gastrointestinal digestion, the contents and absorption rates of free phenols and ferulic acid in fermented wheat bran enriched bread were higher. Moreover, fermented wheat bran significantly promoted the antioxidant activity of bread.

Keywords: wheat bran enriched bread; araboxylan; phenolic acid; *in vitro* gastrointestinal digestion; antioxidant activity

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180516-243

中图分类号: TS213.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 04-0042-07

引文格式:

罗昆, 杨文丹, 马子琳, 等. 发酵麦麸及其面包面团中阿拉伯木聚糖溶解性与酚酸释放研究[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 42-48. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180516-243. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400500); 国家自然科学基金面上项目 (31071595; 31571877); 比利时国际合作项目 (BE110021000)

第一作者简介: 罗昆 (1993—) (ORCID: 0000-0002-2536-1086), 男, 硕士研究生, 研究方向为烘焙科学、酸面团与功能配料。

E-mail: lkluokun@foxmail.com

*通信作者简介: 黄卫宁 (1963—) (ORCID: 0000-0001-6101-3196), 男, 教授, 博士, 研究方向为烘焙科学与酸面团发酵技术、谷物食品化学。E-mail: wnhuang@jiangnan.edu.cn

LUO Kun, YANG Wendan, MA Zilin, et al. Araboxylan solubilization and phenolic acid release from fermented wheat bran and bread dough incorporated with it[J]. Food Science, 2019, 40(4): 42-48. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180516-243. http://www.spkx.net.cn

烘焙食品已成为世界主流食品^[1], 富含高膳食纤维的麦麸面包受到消费者的广泛欢迎。麦麸成本低^[2]且富含阿拉伯木聚糖(araboxylan, AX)、酚酸及矿物质等成分, 相比普通面粉更有营养价值^[3]。AX能降低胆固醇、促进肠胃蠕动^[4], 麦麸中AX质量分数超过25%, 但水不溶性AX(water unextractable araboxylan, WUAX)和水溶性AX(water extractable araboxylan, WEAX)比例通常高于95:5, 阻碍肠胃消化吸收^[5], 降低其生物利用率^[6]。酚酸(如阿魏酸)具有明显的生理活性, 可用于抗氧化和抗辐射^[7], 但麦麸中阿魏酸通常以结合型或束缚型存在, 游离阿魏酸比例不足0.1%, 能有效被人体吸收利用比例较低^[8]。麦麸预发酵是一种能有效降解WUAX且释放游离酚酸的手段, 但目前关于酵母菌发酵麦麸作为面包功能配料的研究较少, 且使用的酵母菌种类非常单一, 多为酿酒酵母^[5-10]。本研究选用马克斯克鲁维酵母是一种新型的食品安全级酵母, 它在底物诱导条件下能够分泌木聚糖酶、葡聚糖酶等水解酶^[11], 因此它在麦麸发酵体系存在巨大的应用潜能。

本研究分析麦麸发酵及其面包制作过程中AX溶解性及酚酸释放情况, 以麦麸面包及木聚糖酶处理麦麸面包为对照, 对比面包中AX组成特性及酚类化合物体外消化吸收率, 评估发酵麦麸面包抗氧化能力, 为开发营养、健康的高膳食纤维面包提供一定的理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

食品级麦麸(水分14.44%、膳食纤维45.31%、蛋白质16.91%、灰分4.10%) 河北省辛集市福之园面业有限公司; 高级面包粉(水分12.14%、膳食纤维2.98%、蛋白质13.10%、灰分0.75%) 中粮鹏泰面业有限公司; 马克斯克鲁维酵母菌粉(ATCC36534) 上海一研生物科技有限公司; 木聚糖酶(36 500 U/g) 荷兰皇家帝斯曼集团; 胰蛋白酶(2 500 U/mg)、胃蛋白酶(1 200 U/g)、间苯三酚(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

1525型高效液相色谱仪(配有紫外检测器) 美国Waters公司; ICS5000型离子色谱仪(四元梯度泵) 美国戴安公司; TU-1810型紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 方法

1.3.1 发酵麦麸制备

将马克斯克鲁维酵母活化至对数稳定期, 用无菌生理盐水将菌泥配制成浓度为 4×10^7 CFU/mL的菌悬液。取100 g麦麸, 接种6 mL菌悬液, 再加84 mL无菌水, 调制均匀后覆上保鲜膜, 于 (30 ± 0.05) °C连续培养24 h。每6 h取样进行化学分析, 剩余部分用于面包面团制作。

1.3.2 麦麸面包面团制备

麦麸面包面团: 80%面包粉和20%生麦麸; 木聚糖酶麦麸面包面团: 80%面包粉、20%生麦麸和60 U/g木聚糖酶; 发酵麦麸面包面团: 80%面包粉和20%发酵麦麸; 复合麦麸面包面团: 80%面包粉、20%发酵麦麸和60 U/g木聚糖酶。加水量以60%粉计, 发酵麦麸以湿基形式直接添加, 其水分含量需要扣除; 此外将木聚糖酶配制成酶液, 其水分含量也需要扣除。

分别取搅拌松弛(20 min)、醒发后(2 h)的面团样品及烘焙冷却后的面包(中心两片)样品, 冷冻干燥后磨粉过80目筛, 用正己烷脱脂后备用。

1.3.3 阿魏酸释放量测定

将发酵麦麸与3倍体积去离子水在40 °C条件下振荡混合1 h, 于 $12\ 000 \times g$ 离心15 min收集上清液。取1 mL上清液与1 mL甲醇混合均匀, 再次离心保留上清液, 过0.45 μm有机膜后用于色谱分析^[12]。

高效液相色谱条件^[13]: 采用Diamondsil型C₁₈柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相A、B分别为甲醇和磷酸溶液(pH 2.0), 洗脱方法: 0~18 min由25% A变化至90% A, 18~19 min由90% A变化至25% A, 19~24 min保持25% A; 流速1.0 mL/min; 波长320 nm, 进样量20 μL。配制40~140 μg/mL阿魏酸溶液, 绘制标准曲线。

1.3.4 游离酚含量测定

准确称取适量的发酵麦麸及面包面团样品, 与25 mL预热的70%甲醇溶液混合, 70 °C保温10 min后离心收集上清液, 重复操作, 合并上清液定容至50 mL。采用福林-酚试剂法^[14]测定提取液中游离酚含量。配制20~120 μg/mL没食子酸溶液, 绘制标准曲线。

1.3.5 WEAX含量测定

分别将1 g发酵麦麸及面包面团样品与20倍体积去离子水混合, 于20 °C振荡20 min提取WEAX, 将混合物于5 000 r/min离心10 min, 得到WEAX提取液。采用间苯三酚法测定提取液中WEAX含量^[15], 并按公式(1)计算。配制0.1~0.6 mg/mL D-木糖溶液, 绘制标准曲线。

$$\text{WEAX含量}/(\text{mg/g}) = \frac{c \times 0.88 \times n}{m} \quad (1)$$

式中： c 为标准曲线上查得木糖质量/mg；0.88为转换因子； n 为稀释倍数； m 为样品质量/g。

1.3.6 单糖组成分析

将2 g原料粉（麦麸、发酵麦麸、小麦粉）及面包样品与10倍体积去离子水混合，4℃摇床振荡（150 r/min）提取2 h，经过10 000×g冷冻离心后，弃沉淀。吸取5 mL提取液定容至50 mL，直接用于游离单糖测定。另外吸取2.5 mL提取液到水解管，与2.5 mL三氟乙酸溶液（4 mol/L）混合，在高温烘箱中酸解（110℃，2 h），冷却后定容至50 mL，用于可溶性糖分析。称取10 mg原料及面包样品加入5 mL三氟乙酸溶液（2 mol/L），于110℃反应2 h，冷却定容于50 mL容量瓶，用于样品中总糖分析。将样品适当稀释后过0.45 μm微孔滤膜用于单糖分析^[16]。

采用离子色谱法测定样品水解前后的单糖组成及含量，测定条件参照孙元琳等^[17]的方法，按公式（2）计算AX含量，按公式（3）计算分支度：

$$\text{AX含量}/(\text{mg/g}) = \frac{(A+X \times 0.88) \times n}{m} \quad (2)$$

$$\text{分支度} = \frac{\text{阿拉伯糖物质的量}}{\text{木糖物质的量}} \quad (3)$$

式中： A 为阿拉伯糖质量/mg； X 为木糖质量/mg；0.88为转换因子； n 为稀释倍数； m 为样品质量/g。

1.3.7 模拟胃、肠消化吸收实验

称取5.0 g面包冻干粉于250 mL烧杯中，加入100 mL蒸馏水溶解。用稀盐酸调节至pH 2.0，加入1 mL胃蛋白酶溶液（将4 g胃蛋白酶分散溶解到800 mL蒸馏水，再加入16.4 mL稀盐酸，定容至1 L），摇床振荡反应2 h（120 r/min，37℃）模拟胃消化过程。反应结束，立即取15 mL胃消化液放入冰水混合物中，离心后保留上清液置于-20℃冰箱中贮存备用。

将25 mL NaHCO₃溶液（0.5 mol/L）装进30 cm透析袋（8 000~14 000 Da），两端密封后放入胃消化液中。将含有消化液和透析袋的烧杯在摇床中振荡40 min（150 r/min，37℃），向烧杯中加入10 mL胰酶-胆汁混合物（质量浓度分别为4 g/L和25 g/L），继续振荡2 h模拟肠道消化过程。结束后，向透析袋表面喷洒蒸馏水，清理残留物。分别从烧杯（渗液，未被人体吸收的组分）和透析袋（透析液，被人体吸收的组分）中取出15 mL反应液置于冰水混合物中冷却，离心后保留上清液贮存在-20℃冰箱中备用^[5]。

分别按照1.3.3节和1.3.4节方法分别测定胃消化液、肠消化液和吸收液中阿魏酸和游离酚含量。

1.3.8 麦麸面包抗氧化活性测定

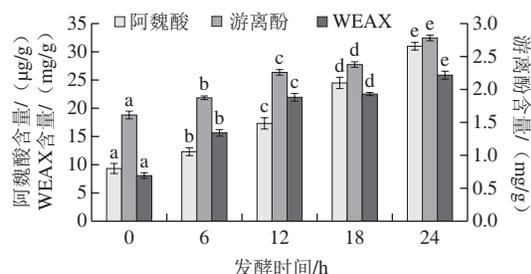
1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH）自由基清除能力测定：取1.3.4节提取液100 μL与3.9 mL DPPH溶液混合，避光反应30 min，在波长517 nm处测定吸光度；2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐（2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS）自由基清除能力测定：取1.3.4节中提取液50 μL与5.0 mL ABTS溶液混合，避光反应10 min，在波长734 nm处测定吸光度。以20~160 μmol/L的Trolox为标样绘制标准曲线^[9]。

1.4 数据处理

除特别说明，1.3节中所有组成分析至少重复3次，结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用Microsoft Office Excel 2016软件进行数据统计分析，应用SPSS 20.0软件进行显著性分析（ $P < 0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 发酵麦麸中阿魏酸、WEAX和游离酚含量测定结果



相同指标不同小写字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。

图1 麦麸发酵过程中WEAX及酚酸含量变化

Fig. 1 Changes in WEAX and phenolic acid content during wheat bran fermentation

由图1可知，麦麸中WEAX含量约为8.01 mg/g，这与崔晨晓等^[14]研究结果相近。发酵过程中，麦麸中WEAX含量从8.01 mg/g（0 h）上升至25.89 mg/g（24 h），增加2.3倍，这与发酵麦麸中的木聚糖酶活力直接相关。Dhillon^[18]和Boskov-Hansen^[13]等发现麦麸本身含有一定量的木聚糖酶，可能是谷物内源酶，也可能是谷物表面附着的微生物酶。此外，AX通常与纤维素等非共价交联形成难溶性复合体，因此纤维素酶、阿魏酸酯酶等其他酶系的存在也会促进AX溶解^[19]。

由图1可知，经过发酵后，麦麸中游离酚含量大幅度提升，发酵24 h时游离酚含量高达2.78 mg/g，这是由于发酵处理打断了多酚与纤维素间的酯键、糖苷键或醚键等，多酚从束缚型或结合型转化成游离状态，从而被甲醇提取^[20]。此外，发酵过程中谷物细胞壁破裂，细胞膜通透性增强，酚类物质更容易游离出来^[21]。类似地，随着发

酵时间延长, 麦麸中阿魏酸含量显著增加 ($P < 0.05$), 这与发酵麦麸中阿魏酸酯酶和木聚糖酶活力都相关^[22]。在麦麸中, 阿魏酸以酯键形式连接在木聚糖的阿拉伯糖侧链^[8], 向麦麸中单独添加阿魏酸酯酶时阿魏酸释放率不足20%, 结合木聚糖酶添加时释放率提升近4倍^[23], 这是由于木聚糖酶首先将大分子半纤维素降解成阿魏酸寡聚多糖后, 阿魏酸酯酶才能有效释放阿魏酸。

2.2 麦麸及小麦粉中AX组成

表1 麦麸、发酵麦麸及小麦粉中游离单糖组成

Table 1 Monosaccharide composition of wheat bran, fermented wheat bran and wheat flour

样品	mg/g				
	阿拉伯糖	木糖	葡萄糖	半乳糖	果糖
麦麸	—	0.11±0.02 ^a	18.17±0.25 ^b	0.38±0.01 ^a	14.22±0.18 ^b
发酵麦麸	0.39±0.01 ^c	0.15±0.02 ^a	18.96±0.12 ^c	0.33±0.02 ^a	24.94±1.26 ^c
小麦粉	0.06±0.03 ^b	0.13±0.03 ^a	16.83±0.10 ^a	0.33±0.01 ^a	13.76±1.08 ^a

注: 同列不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$), 下表同; —. 含量低于检测限。

如表1所示, 麦麸中未检测到游离阿拉伯糖, 发酵后发酵麦麸中阿拉伯糖含量增加至0.39 mg/g。麦麸中游离木糖、葡萄糖和半乳糖含量分别为0.11、18.17 mg/g和0.38 mg/g, 发酵后游离木糖含量未发生显著 ($P > 0.05$) 变化。麦麸中游离果糖含量为14.22 mg/g, 发酵后, 发酵麦麸中游离果糖含量增加至24.94 mg/g, 说明麦麸发酵过程中果聚糖发生明显降解。小麦谷物中果聚糖含量范围为0.9%~2.7%, Struyf等^[24]发现马克斯克鲁维酵母能分泌大量转化酶, 其对面团中果聚糖和木聚糖分子具有较强的降解作用, 且降解产物为酿酒酵母提供能量。小麦粉中游离木糖及游离半乳糖含量与麦麸相当, 而游离葡萄糖和游离果糖含量显著低于麦麸和发酵麦麸 ($P < 0.05$)。

表2 麦麸、发酵麦麸及小麦粉中AX溶解性及分支度

Table 2 Solubilization and branch degree of arabinoxylan in wheat bran, fermented wheat bran and wheat flour

样品	AX		WEAX	
	含量/(mg/g)	分支度	含量/(mg/g)	分支度
麦麸	11.82±0.13 ^c	0.85±0.01 ^c	0.91±0.01 ^a	0.61±0.02 ^b
发酵麦麸	10.48±0.15 ^b	0.70±0.01 ^b	2.69±0.12 ^c	0.56±0.04 ^a
小麦粉	1.76±0.32 ^a	0.66±0.03 ^a	1.46±0.10 ^b	0.60±0.01 ^b

如表2所示, 麦麸和发酵麦麸中AX含量分别为11.82 mg/g和10.48 mg/g, 远高于小麦粉(1.76 mg/g)。发酵麦麸中WEAX含量是麦麸的2.96倍, 这与图1中趋势保持一致, 但是离子色谱法和间苯三酚法测定结果有明显差异。尽管小麦粉中AX含量远低于麦麸, 但小麦粉中WEAX含量为1.46 mg/g, 显著高于麦麸 ($P < 0.05$)。AX分子中阿拉伯糖与木糖的物质的量比通常以分支度形式表示, 其比值越大说明木聚糖分子分支度越高。所有WEAX中分支度都小于AX, 即证实了WEAX分支度低于WUAX。就AX而言, 麦麸中分支度(0.85)显著高于小麦粉(0.66), 而对于WEAX, 两者分支度相当, 说明麦

麸中WEAX分支度与小麦粉相当, 但WUAX分支度远高于小麦粉。麦麸发酵后, AX和WEAX的分支度都明显下降, 说明发酵过程中WUAX和WEAX都发生了降解。

2.3 面包制作过程中游离酚及WEAX含量变化

表3 面团搅拌、醒发及烘焙后游离酚及WEAX含量变化

Table 3 Changes in total phenols and WEAX contents after dough mixing, fermentation and baking

样品	mg/g					
	游离酚含量			WEAX含量		
	搅拌	醒发	烘焙	搅拌	醒发	烘焙
麦麸面团	0.73±0.04 ^a	0.85±0.04 ^b	1.33±0.01 ^d	3.76±0.11 ^e	5.04±1.10 ^f	6.09±0.23 ^g
木聚糖酶麦麸面团	0.81±0.01 ^b	0.75±0.02 ^a	1.26±0.03 ^c	5.11±0.08 ^f	6.61±0.92 ^g	7.66±0.27 ^h
发酵麦麸面团	0.74±0.03 ^a	0.96±0.01 ^c	1.82±0.01 ^d	5.44±0.04 ^b	6.89±1.36 ^e	8.62±0.45 ^f
复合麦麸面团	0.96±0.02 ^c	0.78±0.01 ^a	1.91±0.02 ^d	6.68±0.90 ^f	7.44±0.87 ^g	9.73±0.39 ^d

尽管发酵麦麸中游离酚含量显著高于麦麸(图1), 由表3可知, 搅拌后, 麦麸面团和发酵麦麸面团中游离酚含量没有显著差异 ($P > 0.05$), 而木聚糖酶麦麸面团和复合麦麸面团中游离酚含量分别为0.81 mg/g和0.96 mg/g, 可能是添加的木聚糖酶对面团搅拌过程中酚类化合物释放的贡献较大。面团醒发及烘焙后, 游离酚含量进一步增加, 这是微生物来源酶、麦麸内源酶及木聚糖酶共同降解细胞壁的结果^[25]。从搅拌到烘焙冷却, 发酵麦麸面团和复合麦麸面团中游离酚含量增幅达到100%, 而麦麸面团和木聚糖酶麦麸面团增幅较小, 说明相比木聚糖酶, 发酵处理对麦麸中游离酚释放贡献更大。

由表3可知, 搅拌后, 木聚糖酶麦麸面团和发酵麦麸面团中WEAX含量比麦麸面团高出36%和45%, 复合麦麸面团中WEAX含量最高为6.68 mg/g, 这说明麦麸发酵处理和木聚糖酶协同促进AX溶解。醒发后, 面团中WEAX含量增加了11%~34%。烘焙冷却后面包中WEAX含量进一步增加至6.09~9.73 mg/g, 说明面团中的木聚糖酶在烘焙阶段仍保持活力。Dornez等^[26]发现嗜热菌株(棘孢曲霉)来源的木聚糖酶在面团烘焙初期保持较高活力, AX继续溶解, 面包比容明显提升。然而, 周素梅等^[27]认为高温使木聚糖酶失活且可利用的WUAX底物不足, WEAX含量不再增加; Verjans等^[28]却认为烘焙过程中部分WEAX会与其他组分通过化学链接或物理缠绕变得不可溶。产生这些差异的主要原因是木聚糖酶耐热性和抑制敏感性不同。

2.4 麦麸面包中木聚糖组成

表4 发酵麦麸对面包中木聚糖溶解性及分支度的影响

Table 4 Effects of fermented wheat bran on solubilization and branch degree of arabinoxylan in bread

样品	AX		WEAX	
	含量/(mg/g)	分支度	含量/(mg/g)	分支度
麦麸面包	3.51±0.14 ^a	0.79±0.07 ^b	1.03±0.09 ^a	0.60±0.01 ^a
木聚糖酶麦麸面包	3.29±0.12 ^a	0.77±0.04 ^b	1.05±0.05 ^a	0.61±0.04 ^a
发酵麦麸面包	3.58±0.24 ^a	0.68±0.06 ^a	1.44±0.07 ^b	0.63±0.07 ^b
复合麦麸面包	3.42±0.18 ^a	0.68±0.04 ^a	1.49±0.11 ^b	0.64±0.01 ^b

如表4所示, 面包中AX含量范围是3.29~3.58 mg/g, 且面包组间不存在显著差异 ($P>0.05$)。麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包中WEAX含量相当, 这与Messia等^[16]研究结果保持一致, 且显著低于发酵麦麸面包和复合麦麸面包, 这可能是由于发酵前后麦麸的组成差异 (图1) 及发酵麦麸中的天然酶在面包制作过程中持续发生作用 (表3)。Messia等^[16]同样采用离子色谱法, 测定的酸面团面包中WEAX含量高达3.1 mg/g, 远高于本研究中的发酵麦麸面包 (1.44 mg/g), 这与菌株特性、发酵参数及面包制作工艺等有关。

与麦麸、发酵麦麸及小麦粉中AX结构相似, 面包中AX分支度明显高于WEAX。麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包中的AX分子 (包括WUAX和WEAX) 分支度相近, 发酵麦麸面包和复合麦麸面包中的AX分子分支度相近。这说明相比木聚糖酶, 发酵处理对麦麸面包中WUAX和WEAX分子分支度影响更大。就AX而言, 麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包的分支度显著高于发酵麦麸面包和复合麦麸面包, 而对于WEAX刚好相反, 这说明发酵麦麸更倾向于降解WUAX, 生成大分支度的WEAX; 而木聚糖酶更大程度降解了WEAX。周素梅等^[27]认为高品质的烘焙木聚糖酶通常能够有效降解WUAX, 且WEAX不被过度降解。因此认为马克斯克鲁维酵母发酵处理能够有效提高麦麸在面包中的应用性能。

2.5 麦麸面包中酚类化合物消化吸收

表5 发酵麦麸对肠胃中游离酚消化吸收效果的影响

Table 5 Effect of fermented wheat bran on *in vitro* digestibility and absorption of free phenolics in bread

样品	游离酚含量/(mg/g)		
	胃消化	肠消化	吸收
麦麸面包	3.86±0.10 ^a	3.00±0.15 ^a	0.74±0.05 ^a
木聚糖酶麦麸面包	4.22±0.06 ^b	3.40±0.09 ^b	0.80±0.03 ^a
发酵麦麸面包	5.69±0.06 ^c	4.35±0.22 ^b	0.86±0.05 ^b
复合麦麸面包	6.32±0.24 ^d	5.06±0.23 ^b	0.99±0.00 ^c

未消化的麦麸面包中游离酚含量分别为1.33 mg/g (麦麸面包: 样品麦麸面团烘焙后) 和1.26 mg/g (木聚糖酶麦麸面包: 样品木聚糖酶麦麸面团烘焙后), 显著低于发酵麦麸面包 (样品发酵麦麸面团烘焙后) 和复合麦麸面包 (样品复合麦麸面团烘焙后), 其含量分别为1.82 mg/g和1.91 mg/g (表3)。如表5所示, 胃消化后, 酚类化合物进一步被释放, 面包中游离酚含量范围为3.86~6.32 mg/g, 其中复合麦麸面包中游离酚含量显著高于木聚糖酶麦麸面包和发酵麦麸面包, 这说明发酵处理及木聚糖酶协同促进胃液中酚释放。Liyana-Pathirana等^[29]发现, 经过胃液消化, 硬麦粉样品中游离酚含量增加1.36~4.13倍, 这是由于胃液酸性环境及水解酶活力双重作用破坏了酚与其他组分间 (如蛋白质和木聚糖等)

的化学键, 释放出游离酚。经过肠道消化后游离酚含量有所下降, 面包中游离酚含量为3.00~5.06 mg/g。Argyri等^[30]发现红酒经过肠道消化后游离酚有所损失, 苹果经过肠道消化后游离酚含量也显著降低 ($P<0.05$)。麦麸面包中游离酚吸收量最低为0.74 mg/g, 发酵麦麸面包和复合麦麸面包吸收液中游离酚含量也只有为0.86 mg/g和0.99 mg/g, 可能是因为大量酚类化合物分子质量较大, 难以透过透析袋, 此外部分酚与其他组分连接形成大分子质量的聚合物。

表6 发酵麦麸对肠胃中阿魏酸消化吸收效果的影响

Table 6 Effect of fermented wheat bran on *in vitro* digestibility and absorption of ferulic acid in bread

样品	游离阿魏酸含量/($\mu\text{g/g}$)			
	未消化	胃消化	肠消化	吸收
麦麸面包	7.04±0.09 ^a	22.37±0.93 ^a	19.01±0.32 ^b	12.98±0.15 ^a
木聚糖酶麦麸面包	7.13±0.17 ^a	22.47±0.97 ^a	17.98±0.09 ^a	13.00±0.28 ^a
发酵麦麸面包	7.96±0.11 ^b	24.90±0.52 ^c	19.92±0.28 ^b	14.08±0.23 ^b
复合麦麸面包	8.11±0.20 ^c	23.59±0.92 ^b	20.87±0.26 ^c	14.15±0.08 ^b

如表6所示, 未消化面包中游离阿魏酸含量非常低 (7.04~8.11 $\mu\text{g/g}$), 这是因为阿魏酸多以结合态形式存在难以被甲醇提取^[31], Liyana-Pathirana等^[29]认为小麦粉中本身不含游离阿魏酸。胃消化后, 面包中阿魏酸含量增加1.91~2.18倍, 而Liyana-Pathirana等^[29]研究中, 胃液消化后硬麦粉样品中游离阿魏酸含量仅增加1.40%~55.56%。与游离酚相似, 肠道消化后面包中游离阿魏酸含量下降至17.98~20.87 $\mu\text{g/g}$, 且复合麦麸面包中阿魏酸含量最高。肠消化液中67.80%~72.30%阿魏酸都被吸收, 这说明阿魏酸吸收率普遍较高。Rondini等^[32]认为肠道中酚酸吸收是一个缓慢而持续的过程, 且结合状态的酚酸生物利用效果优于游离状态; Nordlund等^[5]发现结肠吸收阿魏酸主要集中在发酵前2 h, 但整个吸收过程持续24 h以上。

2.6 麦麸面包抗氧化活性

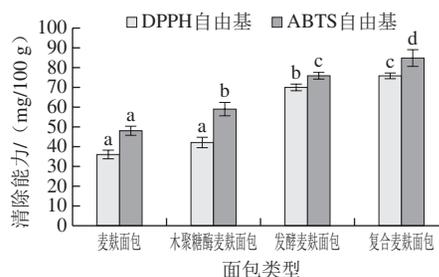


图2 发酵麦麸对面包DPPH自由基和ABTS自由基清除能力的影响

Fig. 2 Effect of fermented wheat bran on DPPH and ABTS radical scavenging activity of bread

由图2可知, 相比麦麸面包, 木聚糖酶麦麸面包的DPPH自由基和ABTS自由基清除能力分别增加16.67%和

22.92%，这是因为WEAX也具有一定的抗氧化活性。研究表明^[9]挤压改性后的麦麸中可溶性多糖含量增加1.7倍，自由基清除能力和还原力也显著提高（ $P < 0.05$ ）。相比麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包，添加发酵麦麸的面包（发酵麦麸面包和复合麦麸面包）具有更强的DPPH自由基和ABTS自由基清除能力，这是因为麦麸发酵处理释放出更多的游离酚酸（图1）。陈中伟等^[7]分别用碱和酶水解麸皮的外皮层、中间层和糊粉层发现各层酚酸组成和含量差异较大，且水解物抗氧化强度与游离酚酸含量呈正相关；且曾岚等^[33]研究发现麦麸的抗氧化能力与游离阿魏酸含量密切相关。整体而言，麦麸面包抗氧化能力大小为复合麦麸面包 > 发酵麦麸面包 > 木聚糖酶麦麸面包 > 麦麸面包，这与面包中游离酚酸和WEAX含量直接相关。

3 结论

麦麸发酵过程中（0~24 h），WEAX含量从8.01 mg/g 上升至25.89 mg/g；游离酚和阿魏酸含量分别增加了73%和234%。麦麸中未检测到游离阿拉伯糖，发酵麦麸中游离阿拉伯糖、葡萄糖和果糖含量分别增加至0.39、18.96、24.94 mg/g。离子色谱结果显示：发酵麦麸中WEAX含量分别是麦麸和小麦粉的2.96倍和1.84倍，发酵麦麸中AX与WEAX的分支度低于麦麸，这说明发酵过程中WUAX和WEAX都发生了降解；发酵麦麸面包和复合麦麸面包中WEAX含量分别为1.44 mg/g和1.49 mg/g，显著高于麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包（ $P < 0.05$ ）；含有发酵麦麸的面包中AX降解生成大量高分支度的WEAX。麦麸面包制作过程中，游离酚和WEAX含量持续增加，尤其是复合麦麸面团效果最明显。胃、肠消化后发酵麦麸面包和复合麦麸面包中游离酚含量均高于麦麸面包和木聚糖酶麦麸面包，其中复合麦麸面包中游离酚吸收量高达0.99 mg/g。胃、肠消化后67.80%~72.30%阿魏酸被吸收，且发酵麦麸面包和复合麦麸面包吸收量最高。此外，发酵麦麸显著提高了面包的抗氧化活性。将发酵麦麸作为功能配料应用到面包中，有望制得营养丰富、抗氧化活性强的高膳食纤维面包。

参考文献：

- [1] 王晓艳, 王宏兹, 黄卫宁, 等. 高膳食纤维面团热机械学及面包的烘焙特性[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 78-83.
- [2] 钟京, 王凤, 刘娜, 等. 乳酸菌发酵麸皮酸面团对高纤维面包面团流变发酵学及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 49-57.
- [3] 孙银凤, 徐岩, 黄卫宁, 等. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 37-42. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201513008.
- [4] ALEIXANDRE A, MIGUEL M. Dietary fiber and blood pressure control[J]. Food Function, 2016, 7(4): 1864-1871. DOI:10.1039/C5FO00950B.
- [5] NORLUND E, KATINA K, AURA A M, et al. Changes in bran structure by bioprocessing with enzymes and yeast modifies the *in vitro* digestibility and fermentability of bran protein and dietary fibre complex[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(1): 200-208. DOI:10.1016/j.jcs.2013.05.006.
- [6] MAES C, DELCOUR J A. Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2002, 35(3): 315-326. DOI:10.1006/j.jcs.2001.0439.
- [7] 陈中伟, 廉文蕾, 吴保承, 等. 小麦麸皮结构层中抗氧化物质的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 66-68; 72.
- [8] 胡博涵, 吴晖, 赖富饶, 等. 产阿魏酸酯酶菌株的筛选及其酚酸释放研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 92-98.
- [9] 王文侠, 李馥邑, 徐伟丽, 等. 挤压处理提高玉米麸皮水溶性多糖含量及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 107-111; 116.
- [10] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 28-36. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.08.062.
- [11] FONSECA G G, HEINZLE E, WITTMANN C, et al. The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 79(3): 339-354. DOI:10.1007/s00253-008-1458-6.
- [12] 胡博涵, 吴晖, 赖富饶, 等. 产阿魏酸酯酶菌株的筛选及其酚酸释放研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 92-98.
- [13] BOSKOV-HANSEN H, ANDREASEN M F, NIELSEN M M, et al. Changes in dietary fibre, phenolic acids and activity of endogenous enzymes during rye bread-making[J]. European Food Research and Technology, 2014, 214(1): 33-42. DOI:10.1007/s00217-001-0417-6.
- [14] 崔晨晓, 朱科学, 郭晓娜, 等. 酵母菌发酵对小麦麸皮成分的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 25-29.
- [15] 杨莉, 黄玉莲, 常萍, 等. 小麦阿拉伯木聚糖含量的QTL分析及其与品质性状的关系[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1695-1701.
- [16] MESSIA M C, REALE A, MAIURO L, et al. Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 138-144. DOI:10.1016/j.jcs.2016.03.004.
- [17] 孙元琳, 顾小红, 朱松, 等. 黑小麦面粉成聚糖的部分酸水解特征与组成分析[J]. 中国食品学报, 2015, 15(4): 227-232.
- [18] DHILLON G S, OBEROI H S, KAUR S, et al. Value-addition of agricultural wastes for augmented cellulase and xylanase production through solid-state tray fermentation employing mixed-culture of fungi[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 1160-1167. DOI:10.1016/j.indcrop.2011.04.001.
- [19] 徐君飞, 张居作. 微生物 β -1,4-内切木聚糖酶研究进展[J]. 中国酿造, 2014, 33(5): 15-17.
- [20] 张思佳, 张薇, 苏晓琴. 乳酸菌发酵对荞麦面包抗氧化及烘焙特性影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 49-53.
- [21] KATINA K, LAITILA A, JUVONEN R, et al. Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye[J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 175-186. DOI:10.1016/j.fm.2006.07.012.
- [22] 赵浩源, 张迎亚, 蒋侃侃, 等. 黑曲霉固态发酵产阿魏酸酯酶及酶解麸皮制备阿魏酸[J]. 林业工程学报, 2016, 32(5): 52-57.
- [23] YU P, MCKINNON J J, MAENZ D D, et al. Enzymic release of reducing sugars from oat hulls by cellulase, as influenced by aspergillus ferulic acid esterase and trichoderma xylanase[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(1): 218-223. DOI:10.1021/jf020476x.
- [24] STRUYF N, LAURENT J, VERSPREET J, et al. *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* cocultures allow reduction

- of fermentable oligo-, di-, and monosaccharides and polyols levels in whole wheat bread[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(39): 8704-8713. DOI:10.1021/acs.jafc.7b02793.
- [25] KATINA K, SALMENKALLIO-MARTTILA M, PARTANEN R, et al. Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2006, 39(5): 479-491. DOI:10.1016/j.lwt.2005.03.013.
- [26] DORNEZ E, VERJANS P, ARNAUT F, et al. Use of psychrophilic xylanases provides insight into the xylanase functionality in bread making[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(17): 9553-9562. DOI:10.1021/jf201752g.
- [27] 周素梅, 王璋, 许时婴. 面包制作过程中戊聚糖酶的作用机理[J]. *无锡轻工大学学报*, 2001, 20(3): 275-279.
- [28] VERJANS P, DORNEZ E, DELCOUR J A, et al. Selectivity for water-unextractable arabinoxylan and inhibition sensitivity govern the strong bread improving potential of an acidophilic GH11 *Aureobasidium pullulans* xylanase[J]. *Food Chemistry*, 2010, 123(2): 331-337. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.04.039.
- [29] LIYANA-PATHIRANA C M, SHAHIDI F. Antioxidant activity of commercial soft and hard wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by gastric pH conditions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(7): 2433-2440. DOI:10.1021/jf049320i.
- [30] ARGYRI K, KOMAITIS M, KAPSOKEFALOU M. Iron decreases the antioxidant capacity of red wine under conditions of *in vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(2): 281-289. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.02.035.
- [31] 孙元琳, 崔璨, 顾小红, 等. 黑小麦麸皮酚酸物质的定性分析与阿魏酸含量测定[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(11): 113-117.
- [32] RONDINI L, PEYRAT-MAILLARD M N, MARSSET-BAGLIERI A M, et al. Bound ferulic acid from bran is more bioavailable than the free compound in rat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(13): 4338-4343. DOI:10.1021/jf0348323.
- [33] 曾岚, 陈荣华, 昀蒋, 等. 发酵麦麸酚酸类物质的抗氧化活性的研究[J]. *粮食与油脂*, 2015, 40(12): 128-131.