

宋微, 辛嘉英, 路雪纯, 等. 小麦中阿魏酸的分布、存在形式以及制备方法的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 445-452. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070224

SONG Wei, XIN Jiaying, LU Xuechun, et al. Research Progress on Distribution, Forms and Preparation Methods of Ferulic Acid in Wheat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 445-452. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070224

· 专题综述 ·

# 小麦中阿魏酸的分布、存在形式以及 制备方法的研究进展

宋 微<sup>1</sup>, 辛嘉英<sup>1,2,\*</sup>, 路雪纯<sup>1</sup>, 肖婧泓<sup>1</sup>, 李 越<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨商业大学食品科学与工程重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所羰基合成与选择氧化国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘 要:** 阿魏酸是一种有益人类健康的酚酸, 它可以使糖尿病、胆固醇、心脏病和癌症等严重疾病的风险降低。在小麦中阿魏酸是含量最高的酚酸类物质, 主要集中在小麦麸皮部位。随着人们保健意识的不断提高, 小麦麸皮中阿魏酸的制备和阿魏酸功能研究日益受到重视。小麦麸皮制备阿魏酸的方法一般有碱解法、生物酶法和生物发酵法, 也有很多研究通过物理手段来辅助以上制备方法, 例如超声波、高温蒸汽等。本文通过总结小麦中阿魏酸的分布、存在形式及利用小麦麸皮制备阿魏酸的方法, 分析以小麦麸皮为原料制备阿魏酸方法优缺点, 为小麦麸皮中阿魏酸的开发研究和工业化生产提供一些参考和思路。

**关键词:** 小麦, 阿魏酸, 分布, 存在形式, 小麦麸皮, 制备

中图分类号: TS202.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)14-0445-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070224



本文网刊:

## Research Progress on Distribution, Forms and Preparation Methods of Ferulic Acid in Wheat

SONG Wei<sup>1</sup>, XIN Jiaying<sup>1,2,\*</sup>, LU Xuechun<sup>1</sup>, XIAO Jinghong<sup>1</sup>, LI Yue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. State Key Laboratory of Carbonyl Synthesis and Selective Oxidation, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Ferulic acid is a beneficial human health phenolic acid that reduces the risk of serious diseases such as diabetes, cholesterol, heart disease and cancer. Ferulic acid is the highest content phenolic acid in wheat, mainly concentrated in wheat bran. With the improvement of people's awareness of health care, the preparation and function of ferulic acid in wheat bran have been paid more and more attention. The methods of preparing ferulic acid from wheat bran generally include alkaline hydrolysis, biological enzyme and biological fermentation, and many studies have assisted the above preparation methods by physical means, such as ultrasonic and high temperature steam, etc. In this paper, the distribution and form of ferulic acid in wheat and the method of preparing ferulic acid from wheat bran are summarized, and the advantages and disadvantages of the method of preparing ferulic acid from wheat bran are analyzed, so as to provide some references and ideas for the development, research and industrial production of ferulic acid in wheat bran.

**Key words:** wheat; ferulic acid; distribution; form of existence; wheat bran; preparation

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21573055); 中央支持地方高校改革发展资金人才培养支持计划项目 (高水平人才) (304017); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2020C063)。

作者简介: 宋微 (1981-), 女, 博士研究生, 研究方向: 生物催化, E-mail: 474835302@qq.com。

\* 通信作者: 辛嘉英 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物催化, E-mail: xinjiayingvip@163.com。

阿魏酸又称 3-甲氧基-4-羟基肉桂酸,因最初在阿魏中发现所以得名阿魏酸,其结构式为  $C_{10}H_{10}O_4$ , 分子结构如图 1 和图 2 所示,分子量为 194.19<sup>[1]</sup>。阿魏酸有顺式和反式两种结构,顺式为黄色油状物,反式为正方形结晶或纤维结晶,熔点为 174 °C,溶于热水,乙醇和乙酸乙酯,稍溶于乙醚,难溶于苯和石油醚<sup>[2]</sup>。阿魏酸是一种广泛存在于植物中的酚酸,在细胞壁中与多糖和蛋白质结合成为细胞壁的骨架。在食品原料中,咖啡、谷壳、香兰豆、麦麸、米糠中的阿魏酸含量较高。迄今为止,阿魏酸已被证实具有多种生物活性,是一种有益人类健康的酚酸,它可以使糖尿病、胆固醇、心脏病和癌症等严重疾病的风险降低,且具有优异的抗氧化和抑菌的特性<sup>[3]</sup>。

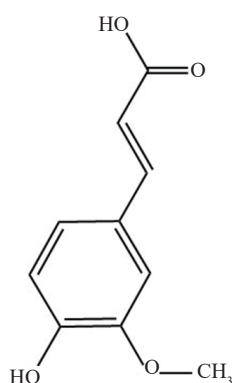


图 1 顺式阿魏酸

Fig.1 Cis-ferulic acid

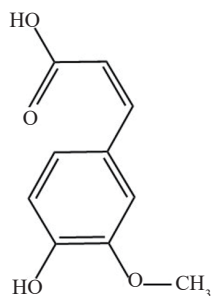


图 2 反式阿魏酸

Fig.2 Trans-ferulic acid

在日本、美国等一些发达国家为了提高食品的品质,已将阿魏酸和阿魏酸衍生物作为食品添加剂在食品中使用,比如可作为抗氧化剂和机能促进剂应用到运动食品中<sup>[4]</sup>,也可作为防腐剂应用在普通食品中。现阶段,阿魏酸在食品添加剂方向主要的研究应用有抗氧化剂、食品香料、食品交联剂、抗菌剂。作为抗氧化剂,阿魏酸及其衍生物可抑制鱼油<sup>[5]</sup>、菜籽油、亚麻籽油、初榨橄榄油<sup>[6]</sup>等氧化。作为食品香料,阿魏酸可作为底物生产香兰素<sup>[7]</sup>。作为食品交联剂,阿魏酸可和多糖交联制备食品胶和可食性包装膜<sup>[8-9]</sup>。作为抗菌剂,阿魏酸及其衍生物可抑制食品中单核李斯特菌、大肠杆菌<sup>[10-11]</sup>等。在我国,一些肉桂酸类衍生物,如肉桂酸甲酯、肉桂酸乙酯、肉桂酸

苜酯等可作为香料类食品添加剂用在食品中<sup>[12]</sup>。

小麦麸皮大约占小麦籽粒重量的 25%<sup>[13]</sup>,是小麦加工过程中最重要的副产物,每年产量可达 1.5 亿吨<sup>[14]</sup>。羟基肉桂酸衍生物是小麦麸皮中含量最多的酚酸,其中阿魏酸约占麸皮重量的 0.4%~0.7%,占总酚酸的绝大多数<sup>[11]</sup>。在资源循环和环境友好制备的前提下,以小麦麸皮为原料制备阿魏酸具有副产物再利用和提升麦麸价值的深远意义。

在采用小麦麸皮制备阿魏酸之前,了解小麦中阿魏酸的分布、存在形式有助于选择适合的制备方法有针对性地小麦麸皮中阿魏酸合理的释放出来。本论文主要介绍了小麦中阿魏酸的分布、结合形式以及以小麦麸皮制备阿魏酸的研究进展情况,通过分析以小麦麸皮为原料制备阿魏酸的各种方法优缺点,为后续小麦麸皮中阿魏酸的开发研究和工业化生产提供一些参考和思路。

## 1 小麦中阿魏酸分布及存在形式

### 1.1 小麦中阿魏酸的分布

酚类物质分布于植物的不同部位,且分布的含量也有所差异<sup>[15]</sup>。在植物体内的代谢过程中,苯丙氨酸途径的第一个底物为苯丙氨酸,它启动酚酸的生物合成,酚酸属于植物的次生代谢产物<sup>[16]</sup>。在植物受到各种生物和非生物刺激时,植物体内会启动防御机制,在植物的发育过程中,酚酸物质受环境因素影响会在植物的不同组织和细胞中积累。因此,植物的不同部位含有不同数量和种类的酚酸<sup>[17]</sup>。在小麦中阿魏酸是含量最高的酚酸类物质,小麦麸皮含有大量的阿魏酸及其氧化偶联产物(称为阿魏酸或阿魏酸脱氢二聚体)。表 1 为小麦籽粒不同部位阿魏酸(mg/g 干物质)含量。表 1 中 FA 为阿魏酸;DHD 为阿魏酸脱氢二聚体;DHT 为阿魏酸脱氢三聚体;从表 1 中可以看出阿魏酸在谷物的颗粒中分布不均匀,且在小麦籽粒的果皮部位中阿魏酸的含量最高,为 8.18 mg/g,DHD 达 5.12 mg/g,DHT 达 1.21 mg/g;在谷物的外层中阿魏酸含量最高,而在谷物的胚乳层中阿魏酸含量最低<sup>[18]</sup>。

### 1.2 小麦中阿魏酸的存在形式

小麦中存在 3 种形式的阿魏酸,即游离型(水溶型)、可溶性结合型(酯溶型)和不可溶性结合型(束

表 1 小麦籽粒不同部位阿魏酸、阿魏酸脱氢二聚体和阿魏酸脱氢三聚体(mg/g 干物质含量)<sup>[19-20]</sup>

Table 1 FA, DHD and DHT in different parts of wheat kernel (mg/g dry matter content)<sup>[19-20]</sup>

组织	阿魏酸	阿魏酸脱氢二聚体	阿魏酸脱氢三聚体
麸皮(Bran)	5.26	1.01	0.24
胚乳(Endosperm)	0.1	0.03	0.00
糊粉层(Aleurone)	8.17	1.07	0.11
种皮(Intermediate layer)	5.92	0.91	0.07
果皮(Pericarp)	8.18	5.12	1.21
胚盘(Scutellum)	3.48	0.37	0.03
胚轴(Embryonic axis)	0.31	0.09	0.01

缚型), 小麦中的阿魏酸主要为不可溶性结合型<sup>[21]</sup>。研究表明, 谷粒中游离阿魏酸大部分与多糖和甾醇结合<sup>[22]</sup>。麦麸中含量最高的阿魏酸是细胞壁多糖的结构元素, 大多数阿魏酸与细胞壁结构共价结合<sup>[23]</sup>。Adom 等<sup>[24]</sup>通过测定小麦的酚酸含量, 得出小麦颗粒中大部分酚类化合物均为阿魏酸, 各种形式的阿魏酸比例分别为游离型 0.2%、可溶性结合型 1%、不可溶性结合型 98.8%。Kaur 等<sup>[25]</sup>的研究同样说明了小麦麸皮中的阿魏酸大部分以不可溶性结合型存在, 他们发现碱解小麦麸皮中得到的阿魏酸高于纯水提取, 从 4 种小麦麸皮中分离得到的富含纤维素的阿拉伯木聚糖组分, 经红外光谱分析证实了半纤维素在 1364、1028 和 849  $\text{cm}^{-1}$  处存在波段信号, 说明在木聚糖主链上存在很多阿拉伯糖残基支链, 在 1520  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收带证实了酚环结构的存在, 这与阿魏酸的酯化结构有关。

阿拉伯木聚糖(AX)属于非淀粉多糖, 它是麦麸细胞壁的主要结构成分。如图 3 所示, 麦麸中的非淀粉多糖由  $\beta$ -1,4-糖苷键连接  $\beta$ -D-吡喃类木糖残基形成主干。 $\alpha$ -L-阿拉伯呋喃糖取代基与木糖残基的(O)-2 和/或(O)-3 位置相连, AX 中的阿拉伯糖/木糖(A/X)比值在 0.3~1.1 之间, 比值与小麦的植物来源有关, 阿魏酸间或与木质素或阿拉伯糖残基以酯键相连, 或阿魏酸本身酯化形成二阿魏酸<sup>[27]</sup>。

目前, 从禾草细胞壁中分离到的阿魏酰低聚糖均具有相同的结构。D-木聚糖通过  $\beta$ -1,4-糖苷键相连成骨架链,  $\alpha$ -L-呋喃型阿拉伯糖残基与木糖残基

O-3 位相连, 阿魏酸与阿拉伯糖残基上的 O-5 位相连<sup>[27]</sup>, 表 2 为阿魏酸与阿拉伯糖基木聚糖的链接位置, 目前的很多研究结果也证实了这一点。

## 2 利用小麦麸皮制备阿魏酸的方法

如上所述, 阿魏酸在麦麸中的含量较多, 多为束缚型, 是含量最大的酚酸, 和细胞壁多糖、木质素以酯键相连<sup>[34]</sup>, 所以小麦麸皮是制备阿魏酸非常好的原料来源。在胃肠道运输过程中小麦麸皮中的阿魏酸不会从食物基质中释放出来, 从而无法被肠道吸收和利用, 这是小麦麸皮中阿魏酸生物利用的一个限制因素, 在之前的体外研究中发现, 麸粉和富含麸粉面包的生物可及性极低(1%)<sup>[35]</sup>。为了提高小麦麸皮中阿魏酸的生物利用度, 必须将小麦麸皮中的束缚型阿魏酸从小麦麸皮基质中释放出来。酸碱法、生物酶法或发酵法、物理辅助法等都能释放小麦麸皮中阿魏酸。传统有机溶剂提取的只是麦麸中的游离型阿魏酸, 利用碱解提取的是束缚型和游离型阿魏酸, 生物法能够获得各种形式的阿魏酸, 所以生物法是获得阿魏酸最大量的制备方法。基于目前以小麦麸皮制备阿魏酸的研究, 本文主要分析每种制备方法的优势和局限。

### 2.1 碱解法

采用酸解或碱解均可制备麦麸酚酸, 但 Robbins 等<sup>[36]</sup>研究表明在高温的酸性环境下获得酚酸类物质会发生分解, 所以采用酸解法会使阿魏酸的提取率降低。强碱(如氢氧化钠)可以破坏酯键, 释放游离的阿魏酸。因此, 麦麸可通过碱性水解制备阿魏酸。

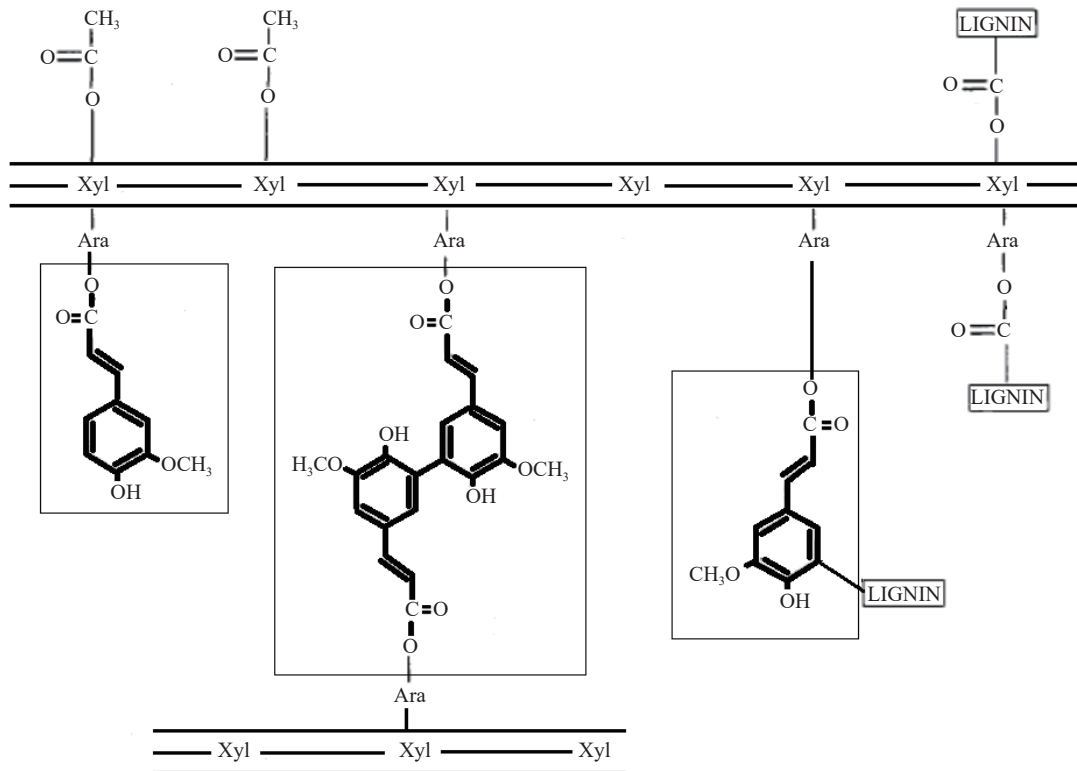


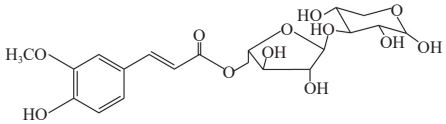
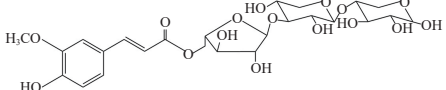
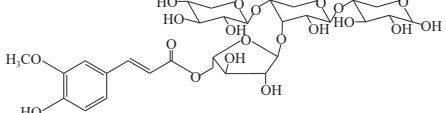
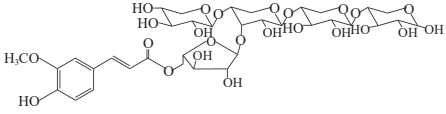
图 3 小麦麸皮中戊聚糖的结构图<sup>[26]</sup>

Fig.3 Structure diagram of pentosan in wheat bran<sup>[26]</sup>



表2 麦麸中阿魏酸与阿拉伯糖基木聚糖链接位置

Table 2 Linking location of ferulic acid and arabinosyl xylan in wheat bran

分子式	分子组成	文献
	FA-ara-xly(阿魏酰阿拉伯糖基木糖)	[28]
	FA-ara-(xly)2(阿魏酰阿拉伯糖基二糖)	[29-30]
	FA-ara-(xly)3(阿魏酰阿拉伯糖基三糖)	[31-32]
	FA-ara-(xly)4(阿魏酰阿拉伯糖基四糖)	[33]

Idea 等<sup>[37]</sup>以小麦发酵啤酒的副产物(啤酒废粮)为原料,进行碱性水解,可以提高阿魏酸的产量。碱解法可以有效地从小麦麸皮基质中释放阿魏酸,但在后续处理存在风险,因为生产阿魏酸后,采用酸处理生产过程的碱会导致盐的产生,当引入水流会增加周围土壤的盐分和其他生态变化而导致土壤贫瘠问题,同时这种制备方法不能充分保存阿魏酸的活性,近几年研究者几乎均采用生物法来制备小麦麸皮中的阿魏酸。

## 2.2 生物法

### 2.2.1 酶解法

2.2.1.1 单一酶法 阿魏酸酯酶(EC3.1.1.73)是一种微生物的胞外酶,可以催化阿魏酸和多糖间酯键水解,如阿拉伯木聚糖和果胶阿拉伯多糖生产阿魏酸和多糖部分<sup>[38]</sup>。Nishant 等<sup>[39]</sup>用阿魏酸酯酶水解脱淀粉麦麸,以阿魏酸提取量为考察指标,研究了载酶量、反应时间、pH、温度等工艺参数对阿魏酸提取量的影响,使阿魏酸的提取率提高 2.52 倍。Wang 等<sup>[40]</sup>研究发现单独使用阿魏酸酯酶(从嗜酸乳酸杆菌中分离纯化得到)水解麸皮不释放阿魏酸,该酶与木聚糖酶共同水解麸皮时才能释放阿魏酸得到 12.4 nmol 的阿魏酸,与  $\alpha$ -L-阿拉伯糖苷酶共同水解麸皮时得到 3.64 nmol 的阿魏酸,如果 3 种酶共同水解小麦麸皮,阿魏酸可达到 15.7 nmol,这一点充分证明了木聚糖酶为作用麸皮的主要水解酶, $\alpha$ -L-阿拉伯呋喃糖苷酶为辅助水解酶,此 2 种酶协同阿魏酸酯酶共同作用小麦麸皮可以促进阿魏酸的充分释放。

阿魏酸酯酶单独水解麸皮不释放阿魏酸的原因可能是:麸皮中纤维素所形成的空间致密网状结构阻碍了阿魏酸酯酶分解麦麸释放阿魏酸。在小麦麸皮的降解过程中,细胞壁的半纤维素由木聚糖酶水解成阿魏酸寡聚多糖,这使细胞壁的物理化学性质发生改

变;随后添加阿魏酸酯酶水解阿魏酸和寡聚多糖的酯键,从而提高了麦麸基质中阿魏酸的释放量<sup>[41]</sup>。龚燕燕等<sup>[41]</sup>在酶解植物细胞壁时先添加木聚糖酶比先添加阿魏酸酯酶更有利于释放阿魏酸,也可以证明这一点。

2.2.1.2 酶协同法 降解细胞壁多糖的酶,而不是破坏酚酸和多糖之间的酯键的酯酶,例如木聚糖酶类,在释放游离酚含量中起着最重要的作用<sup>[42]</sup>。纤维素酶、糖苷酶、阿魏酸酯酶共同参与降解细胞壁中的纤维素及半纤维素分子,以破坏细胞壁致密的网状交联结构,可较为彻底地降解植物细胞壁组织<sup>[43]</sup>,可以说其它酶协同阿魏酸酯酶比单独使用阿魏酸酯酶可更好的释放小麦麸皮中的阿魏酸。目前,研究比较多的是阿魏酸酯酶与木聚糖酶类的协同作用。Faulds 等<sup>[44]</sup>率先用黑曲霉(*Aspergillus niger*)阿魏酸酯酶-III 与绿色木霉(*Trichoderma viride*)木聚糖酶协同酶解小麦麸皮,阿魏酸释放量可达到麸皮中总阿魏酸的 95%,比单独用阿魏酸酯酶水解小麦麸皮时提高了约 24 倍。Li 等<sup>[45]</sup>利用木聚糖酶和阿魏酸酯酶的协同水解小麦麸皮,获得了阿魏酸和低聚木糖,与单独使用一种酶相比,在木聚糖酶和阿魏酸酯酶的协同作用下,小麦麸皮释放阿魏酸的比例提高到 70%。*Thermobacillus xylanilyticus* 是一种嗜热和半纤维素分解细菌,能够产生含有木聚糖酶、木糖苷酶、阿拉伯糖苷酶和酯酶活性的酶混合物。Dupoirion 等<sup>[46]</sup>用该混合酶分解脱浆的麦麸,使单体阿拉伯糖、木糖和阿魏酸分别释放 6%、20% 和 37% (w/w)。Wang 等<sup>[47]</sup>利用有木聚糖酶/阿魏酸酯酶双重作用酶,从 20 mg 不溶性小麦阿拉伯木聚糖、脱淀粉麦麸中分离得到高得率 FA(分别为 2.78 和 1.82 mg/g 底物)。这种酶具有木聚糖酶/阿魏酸酯酶的双重功能,生产此酶的重组菌株在生产阿魏酸方面具有很大的应用潜力,可利用重组菌种生产多种催化功能的酶来降低酶制

剂的生产成本。Mfa 等<sup>[48]</sup>研究了小麦麸皮中阿魏酸的酶解提取工艺,阿魏酸提取率高于氢氧化钠控制的水解,证实了通过生物酶法获得有价值的化合物的可行性和潜在的工业开发领域。

**2.2.2 发酵法** 上述中酶法制备阿魏酸是一种从麸皮中有效释放阿魏酸的方法,但是酶制剂因为成本较高,所以越来越多的研究者采用直接发酵小麦麸皮来释放麦麸中的阿魏酸。根据培养基中是否有游离水流动,发酵可分为液态发酵和固态发酵。研究表明液态发酵的方法效果微弱,有效的相应的相关报道在世界权威杂志上几乎检索不到<sup>[49]</sup>,一般采用固态发酵制备小麦麸皮阿魏酸。在发酵过程中,微生物一般会同时代谢出木聚糖酶类、阿魏酸酯酶等共同作用小麦麸皮。在自然界中生产阿魏酸酯酶的大多数微生物为真菌,也有少部分为细菌<sup>[50]</sup>。

Mao 等<sup>[51]</sup>利用从不同食品中分离的乳酸菌(LAB)中筛选出优势菌株粪肠球菌(*Enterococcus faecalis* M2),采用固态发酵法发酵小麦麸皮,使阿魏酸含量提高了 5.5 倍。孙晓明<sup>[52]</sup>探究了酶辅助好食脉孢菌固态发酵麦麸释放阿魏酸的最佳方式,研究发现在先接菌发酵 3 d 后再加入木聚糖酶反应 8 h 条件下阿魏酸产量最高,为 4.27 mg/g。高鹏<sup>[53]</sup>研究了好食脉孢菌在固态发酵条件下,发酵小麦麸皮生产阿魏酸(游离型)的最佳工艺条件,阿魏酸(游离型)的得率达到 71.45%。2015 年胡博涵<sup>[54]</sup>筛选出一株烟青烟曲霉,此菌同时产阿魏酸酯酶、纤维素酶和木聚糖酶,小麦麸皮经固态发酵后,总酚酸释放量提高 6.6 倍,酚酸中阿魏酸占比为 0.697%,较未发酵麸皮的阿魏酸提高了 0.22%。2017 年尹志娜等<sup>[55]</sup>比较三种曲霉发酵麦麸释放结合酚酸的能力,发现黑曲霉能够分泌具有较高酶活性的纤维素酶、木聚糖酶、阿拉伯呋喃糖苷酶和  $\beta$ -糖苷酶,经发酵液分析,其释放结合态阿魏酸的能力最强。同年 Yin 等<sup>[56]</sup>评价了两种丝状真菌对小麦麸皮降解能力,以及对酚酸释放能力的差异,发现黑曲霉对麦麸的降解水平及对阿魏酸的释放水平都明显高于棒曲霉,但是微生物分泌酶系降解麦麸产生酚酸的同时也可能分泌某种酶或其他未知成分来降解某些酚酸组分,当释放率大于降解率时,得到酚酸增加的检测结果,当小于降解率时,测定酚酸值可能会低于原麦麸测定值,说明了小麦麸皮发酵过程中存在微生物消耗阿魏酸的可能。

生物发酵法是一种清洁、对环境友好的生产方式,虽然目前的研究已经说明了发酵法可以有效释放小麦麸皮中的阿魏酸,但是在发酵过程中存在微生物消耗产物阿魏酸的可能。

### 2.3 物理辅助法

利用超声波的空化作用、机械振动、粉碎和扩散等次级效应<sup>[57-59]</sup>,能够破坏小麦麸皮的细胞壁以提高其通透性,促进阿魏酸的释放。超声波具有提取时间

短、室温环境下操作、溶剂需求小和提取率高的优点,是一种目前辅助提取多酚类化合物应用较多的技术<sup>[57-58]</sup>。但是,超声辅助提取不能作为一种独立的方法来实现,其作为预处理或辅助制备酚酸,可能会大大提高多酚的提取率<sup>[60]</sup>。Cherif 等<sup>[61]</sup>采用超声波辅助预处理小麦麸皮来提取阿魏酸等酚酸类物质,超声波处理可以显著提高多酚的总收率,每克小麦麸皮中阿魏酸的产量由 6.31 达到 94.62 mg。对于小麦麸皮中阿魏酸的提取超声波仅仅是一种有效的辅助技术,超声波技术的使用受到相对较高成本的阻碍,这阻碍了工业过程的扩大。除此之外,有些报道说明超声波辅助萃取技术可能会降解敏感的多酚类化合物,如阿魏酸等酚酸类物质<sup>[62]</sup>。

另外,采用高温蒸煮、微粉化等方法对小麦麸皮原料预处理有助于阿魏酸的释放,这些方法可以破坏麦麸中部分的化学键。Liu 等<sup>[63]</sup>研究了高温蒸汽预处理对提高麦麸酚类物质提取率的效果。高温蒸汽辅助萃取可释放结合酚酸,在实验过程中,在 215 °C 下 120 s 高温蒸汽处理后,阿魏酸游离型从 55.7  $\mu\text{g/g}$  增加到 586.3  $\mu\text{g/g}$ ,结合型从 44.9  $\mu\text{g/g}$  增加到 1108.4  $\mu\text{g/g}$ 。Chen 等<sup>[64]</sup>研究了蒸汽闪爆对麦麸酚类成分变化,发现适度蒸汽闪爆处理显著提高了麦麸总可溶性酚含量、游离和共轭阿魏酸含量。Sla 等<sup>[65]</sup>研究麦麸微粉化对抗氧化性能及面团性能的影响,麦麸微粉化后提高了阿魏酸释放量。

## 3 展望

以小麦麸皮为原料制备阿魏酸具有副产物再利用和提升麦麸价值的深远意义,但是目前采用小麦麸皮制备阿魏酸还处于研究阶段,未实现产业化生产。小麦麸皮中富含丰富的非淀粉多糖,可以考虑在工业化生产小麦麸皮膳食纤维的同时实现阿魏酸的生产,通过一次生产得到小麦麸皮中的多种天然产物成分。在小麦麸皮制备阿魏酸的方法中研究者一般采用微生物发酵法或酶解法,生物法相对于化学法对环境较友好、可进行绿色生产,而且生物法更加节能和更具有选择性,利用生物法还可以产生具有不同化学、功能和工艺特征的更大范围的馏分,重要的是,在萃取过程的最后不需要溶剂回收。可以说,在环境可持续发展的大环境下生物法必将是未来制备阿魏酸比较有效的一种方式。在生物法中酶法处理更具体,可以靶向释放目标产物(例如:游离阿魏酸或者共价结合型阿魏酸),但目前酶制剂的成本相对较高,降低产阿魏酸类酶制剂的成本和简化酶法生产阿魏酸的工序,将是实现小麦麸皮生产阿魏酸产业化的主要研究趋势。针对阿魏酸类酶制剂的成本可考虑通过筛选高产酶的菌种、缩短发酵周期、降低发酵原料成本(例如:麦麸的处理成本)实现。在简化酶法生产阿魏酸的工序上,可考虑酶制剂种类的选择,添加的先后顺序等来实现推进小麦麸皮中阿魏酸工业化生产。

## 参考文献

- [1] 孙晓明, 辛嘉英, 林雪, 等. 阿魏酸及其衍生物在食品添加剂领域研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(1): 170-176. [SUN X M, XIN J Y, LIN X, et al. Research progress of ferulic acid and its derivatives in food additives[J]. China Food Additives, 2019, 30(1): 170-176.]
- [2] LIU K W, MAO-RUN F U. Research progress of ferulic acid[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2016.
- [3] LI D, RUI Y X, GUO S D, et al. Ferulic acid: A review of its pharmacology, pharmacokinetics and derivatives[J]. Life Sciences, 2021, 284: 119921.
- [4] BARBARA L, SOFIA C, GIOVANNI M. Wheat bran phenolic acids: Bioavailability and stability in whole wheat-based foods[J]. Molecules, 2015, 20(9): 15666-15685.
- [5] YU L, WANG Y, WEN H, et al. Synthesis and evaluation of acetylferulic paeonol ester and ferulic paeonol ester as potential antioxidants to inhibit fish oil oxidation[J]. Food Chemistry, 2021(8): 130384.
- [6] TANSKA M, MIKOLAJCZAK N, KONOPKA I. Comparison of the effect of sinapic and ferulic acids derivatives (4-vinylsyringol vs. 4-vinylguaiacol) as antioxidants of rapeseed, flaxseed, and extra virgin olive oils[J]. Food Chemistry, 2017, 240: 679-685.
- [7] PRITAM C, GOUTAM B, SUKANTA K, et al. Cleaner production of vanillin through biotransformation of ferulic acid esters from agroresidue by *Streptomyces sannanensis*[J]. Biosystems Engineering, 2018.
- [8] 刘延照, 李想, 刘功继, 等. 辣根过氧化物酶催化阿魏酸交联果胶物化特性[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 9-14. [LIU Y Z, LI X, LIU G J, et al. Physicochemical properties of pectin modified by cross-linking with ferulic acid under the catalysis of horseradish peroxidase[J]. Food Science, 2020, 41(14): 9-14.]
- [9] 贾超, 王利强, 卢立新, 等. 阿魏酸对马铃薯淀粉基复合膜性能的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(7): 82-85. [JIA C, WANG L Q, LU L X, et al. Effect of ferulic acid on properties of potato starch-based composite films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(7): 82-85.]
- [10] SHI Y G, BIAN L Q, ZHU Y J, et al. Multifunctional alkyl ferulate esters as potential food additives: Antibacterial activity and mode of action against *Listeria monocytogenes* and its application on American sturgeon caviar preservation[J]. Food Control, 2019, 96: 390-402.
- [11] TAKAHASHI H, KASHIMURA M, KOISO H, et al. Use of ferulic acid as a novel candidate of growth inhibiting agent against *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat food[J]. Food Control, 2013, 33(1): 244-248.
- [12] 国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 文后附录 B [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [People's Republic of China National Health and Family Planning Commission. GB 2760-2014 Appendix B [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.]
- [13] 吴凡, 蔡红燕, 沈汪洋, 等. 小麦麸皮的营养特性与应用进展[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 284-287. [WU F, CAI H Y, SHEN W Y, et al. Nutritional characteristics and application progress of wheat bran[J]. Food Industry, 2020, 41(5): 284-287.]
- [14] M PRÜCKLER, SIEBENHANDL-EHN S, APPRICH S, et al. Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(2): 211-221.
- [15] BING Z, YZ A, HL A, et al. A review on insoluble-bound phenolics in plant-based food matrix and their contribution to human health with future perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 347-362.
- [16] KUMAR N, GOEL N. Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications[J]. Biotechnology Reports, 2019, 24: e00370.
- [17] WEIDNER S, AMAROWICZ R, KARAMA M, et al. Changes in endogenous phenolic acids during development of *Secalocereale caryopses* and after dehydration treatment of unripe rye grains[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2000, 38(7-8): 595-602.
- [18] PATRICIA R R, ALFONSO V L, TY FORBES-HERNÁNDEZ, et al. Phenolic compounds isolated from olive oil as nutraceutical tools for the prevention and management of cancer and cardiovascular diseases[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 2305-2325.
- [19] BARRON C, SURGET A, ROUAU X. Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(1): 88-96.
- [20] ANTOINE C. Wheat bran tissue fractionation using biochemical markers[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(3): 387-393.
- [21] 王薇薇, 潘奕鸥, 王丽, 等. 谷物中阿魏酸的分布及其生理活性的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(5): 43-48. [WANG W W, PAN Y O, WANG L, et al. Research advances on the distribution and physiological activity of ferulic acid in grain[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(5): 43-48.]
- [22] ZHAO Z, MOGHADASIAN M H. Chemistry, natural sources, dietary intake and pharmacokinetic properties of ferulic acid: A review[J]. Food Chemistry, 2008, 109(4): 691-702.
- [23] A K SINGH, JAGBIR, REHAL, et al. Enhancement of attributes of cereals by germination and fermentation: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(11): 1575-1589.
- [24] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(21): 6182-7.
- [25] 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.
- [26] 张璟. 黑曲霉液体发酵法产酶制备阿魏酸和低聚糖的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2004. [ZHANG J. Production of enzymes from *Aspergillus niger* by liquid culture and their application in preparation of trans-ferulic acid and oligosaccharide[D]. Guangzhou: Jinan University, 2004.]
- [27] MARQUEZ-ESCALANTE J A, CARVJAL-MILLAN E, YADAV M P, et al. Rheology and microstructure of gels based on wheat arabinoxylans enzymatically modified in arabinose to xylose



- ratio[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(3): 914–922.
- [ 28 ] C EL MODAFAR, E EL BOUSTANI. Cell wall-bound phenolic acid and lignin contents in date palm as related to its resistance to *Fusarium oxysporum*[J]. *Biologia Plantarum*, 2001, 44(1): 125–130.
- [ 29 ] YOSHIDA-SHIMOKAWA T, YOSHIDA S, KAKEGAWA K, et al. Enzymic feruloylation of arabinoxylan-trisaccharide by feruloyl-CoA: Arabinoxylan-trisaccharide O-hydroxycinnamoyltransferase from *Oryza sativa*[J]. *Planta*, 2001, 212(3): 470–474.
- [ 30 ] MCCALLUM J A, TAYLOR I, TOWERS G. Spectrophotometric assay and electrophoretic detection of trans-feruloyl esterase activity[J]. *Analytical Biochemistry*, 1991, 196(2): 360–366.
- [ 31 ] RALET M C, FAULDS C B, WILLIAMSON G, et al. Degradation of feruloylated oligosaccharides from sugar-beet pulp and wheat bran by ferulic acid esterases from *Aspergillus niger*[J]. *Carbohydrate Research*, 1994, 263(2): 257–269.
- [ 32 ] RHODES D I, SADEK M, B A STONE. Hydroxycinnamic acids in walls of wheat aleurone cells[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36(1): 67–81.
- [ 33 ] LEQUART C, NUZILLARD J M, KUREK B, et al. Hydrolysis of wheat bran and straw by an endoxylanase: Production and structural characterization of cinnamoyl-oligosaccharides[J]. *Carbohydrate Research*, 1999, 319(1-4): 102.
- [ 34 ] TANG Y, HAO J, FAN C, et al. Preparative separation of high-purity trans- and cis-ferulic acid from wheat bran by pH-zone-refining counter-current chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2020, 1636: 461772.
- [ 35 ] WANG P, HOU C, ZHAO X, 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*, 2018, 87: 570–581.
- [ 36 ] ROBBINS R J. Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2003, 51(10): 2866–2887.
- [ 37 ] IDEIA P, SOUSAFERREIRA I, CASTILHO P C. A novel and simpler alkaline hydrolysis methodology for extraction of ferulic acid from brewer's spent grain and its (partial) purification through adsorption in a synthetic resin[J]. *Foods*, 2020, 9(5).
- [ 38 ] AI M, SAKKA M, KOSUGI A, et al. Significance of a family-6 carbohydrate-binding module in a modular feruloyl esterase for removing ferulic acid from insoluble wheat arabinoxylan.[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2020, 138: 109546.
- [ 39 ] NISHANT G, MADHAVAN N K. Biorefining of wheat bran for the purification of ferulic acid[J]. *Biocatalysis & Agricultural Biotechnology*, 2018, 15: 304–310.
- [ 40 ] WANG X, XIN G, EGASHIRA Y, et al. Release of ferulic acid from wheat bran by an inducible feruloyl esterase from an intestinal bacterium *Lactobacillus acidophilus*[J]. *Food Science and Technology Research*, 2005, 11(3): 241–247.
- [ 41 ] 龚燕燕, 殷欣, 唐存多, 等. 宇佐美曲霉阿魏酸酯酶与木聚糖酶协同作用降解小麦麸皮制备阿魏酸[J]. *中国生物制品学杂志*, 2014, 27(2): 262–266. [ GONG Y Y, YIN X, TANG C D, et al. Synergistic effect of feruloyl esterase and xylanase from *Aspergillus usamii* in preparation of ferulic acid by degradation of wheat bran[J]. *Chinese Journal of Biologicals*, 2014, 27(2): 262–266. ]
- [ 42 ] YIN Z N, YAO K, MIN T, et al. Antioxidant and anti-inflammatory capacity of ferulic acid released from wheat bran by solid-state fermentation of *Aspergillus niger*[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2019, 32(1): 11–21.
- [ 43 ] WONG D W. Feruloyl esterase: A key enzyme in biomass degradation[J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology Part A Enzyme Engineering & Biotechnology*, 2006, 133(2): 87–112.
- [ 44 ] FAULDS C B, WILLIAMSON G. Release of ferulic acid from wheat bran by a ferulic acid esterase (FAE-III) from *Aspergillus niger*[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 1995, 43(6): 1082–1087.
- [ 45 ] LI H, GAN L, JIAN L, 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.
- [ 46 ] DUPOIRON S, LAMELOISE M L, POMMET M, et al. A novel and integrative process: From enzymatic fractionation of wheat bran with a hemicellulase cocktail to the recovery of ferulic acid by weak anion exchange resin[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 105: 148–155.
- [ 47 ] WANG R, YANG J, JIN M J, et al. Efficient ferulic acid and xylo-oligosaccharides production by a novel multi-modular bifunctional xylanase/feruloyl esterase using agricultural residues as substrates[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 297: 122487.
- [ 48 ] MFA B, AH C, GZ A, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran[J]. *New Biotechnology*, 2020, 56: 38–45.
- [ 49 ] 尹志娜. 小麦麸皮固态发酵过程中活性成分释放的机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [ YIN Z N. Study on mechanism of active component released by solid-state fermentation of wheat bran[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. ]
- [ 50 ] TOPAKAS E, VAFIADI C, CHRISTAKOPOULOS P. Microbial production, characterization and applications of feruloyl esterases[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(4): 497–509.
- [ 51 ] MAO M, WANG P, SHI K, et al. Effect of solid state fermentation by *Enterococcus faecalis* M2 on antioxidant and nutritional properties of wheat bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 94: 102997.
- [ 52 ] 孙晓明. 好食脉孢菌发酵小麦麸皮释放阿魏酸及其衍生物研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2019. [ SUN X M. Ferulic acid and its derivatives release from wheat bran by *Neurospora sitophila* fermentation[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2019. ]
- [ 53 ] 高鹏. 好食脉孢菌发酵麸皮制备游离阿魏酸及其改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020. [ GAO P. Study on the preparation and modification of free Ferulic acid from fermentation bran of *Neurospora fastidious*[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020. ]
- [ 54 ] 胡博涵. 利用发酵法释放麦麸中束缚型酚酸及其抗氧化活

- 性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. [ HU B H. Using fermentation release type bound phenolic acids in the wheat bran and its antioxidant activity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. ]
- [ 55 ] 尹志娜, 吴晖, 赖富饶, 等. 两种丝状真菌发酵小麦麸皮中酚酸的释放及与阿魏酸酯酶和木聚糖酶的关系[J]. 现代食品科技, 2017(3): 81-87. [ YIN Z N, WU H, LAI F R, et al. Release of phenolic acid by two filamentous fungi during the fermentation of wheat bran with ferulic acid esterase and xylanase[J]. Modern Food Science and Technology, 2017(3): 81-87. ]
- [ 56 ] YIN Z, WU W, SUN C, et al. Comparison of releasing bound phenolic acids from wheat bran by fermentation of three *Aspergillus* species[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 53(5): 1120-1130.
- [ 57 ] 吴非, 李钊, 周琪, 等. 超声波辅助水酶法提取米胚油及其成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 233-241. [ WU F, LI Z, ZHOU Q, et al. Ultrasonic-assisted aqueous enzymatic extraction and chemical composition of rice germ oil[J]. Food Science, 2020, 41(24): 233-241. ]
- [ 58 ] ALEXANDRE E, CA STRO L, MOREIRA S A, et al. Comparison of emerging technologies to extract high-added value compounds from fruit residues: Pressure- and electro-based technologies[J]. Food Engineering Reviews, 2017, 9(3): 190-212.
- [ 59 ] L F CĂLINOIU, C V DAN. Thermal processing for the release of phenolic compounds from wheat and oat bran[J]. Bio-molecules, 2019, 10(1): 21.
- [ 60 ] QIAO L, YE X, SUN Y, et al. Sonochemical effects on free phenolic acids under ultrasound treatment in a model system[J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2013, 20(4): 1017-1025.
- [ 61 ] CHERIF M M, GRIGORAKIS S, HALAHLAH A, et al. High-efficiency extraction of phenolics from wheat waste biomass (bran) by combining deep eutectic solvent, ultrasound-assisted pretreatment and thermal treatment[J]. Environmental Processes: An International Journal, 2020, 7(3): 845-859.
- [ 62 ] ITAGAKI S, KUROKAWA T, NAKATA C, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant properties of ferulic acid: A comparative study with other natural oxidation inhibitors[J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 466-471.
- [ 63 ] LIU L, ZHAO M, LIU X, et al. Effect of steam explosion - assisted extraction on phenolic acid profiles and antioxidant properties of wheat bran[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(10): 3484-3491.
- [ 64 ] CHEN Y, ZHANG R, LIU C, et al. Enhancing antioxidant activity and antiproliferation of wheat bran through steam flash explosion[J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(7): 3028-3034.
- [ 65 ] SLA C, XJA C, JING G, et al. Impact of wheat bran micronization on dough properties and bread quality: Part I-bran functionality and dough properties[J]. Food Chemistry, 2021, 353(6): 129407.