DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260310005
**引用格式**: 王瑞清, 靳可婷, 李曦, 等. 微波消解-高效液相色谱-蒸发光散射法测定谷物中的总阿拉伯木聚糖含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 335–342.
WANG RQ, JIN KT, LI X, *et al*. Determination of total arabinoxylan content in cereals by microwave digestion-high performance liquid chromatography-evaporative light scattering detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 335–342. (in Chinese with English abstract).

# 微波消解-高效液相色谱-蒸发光散射法测定谷物中的总阿拉伯木聚糖含量

王瑞清, 靳可婷, 李 曦, 雷欣宇, 仲伶俐*
(四川省农业科学院农业质量与检测技术研究所, 成都 610066)

**摘 要: 目的** 建立微波消解-高效液相色谱-蒸发光散射法测定谷物中总阿拉伯木聚糖含量的方法。**方法** 试样经 1.0 mol/L 三氟乙酸溶液 120 ℃微波消解 30 min, 除酸复溶后分析。采用 $NH_2$ 色谱柱(4.6 mm× 250 mm, 5 μm)分离, 以乙腈-水(90:10, *V*:*V*)为流动相进行等度洗脱, 蒸发光散射检测器检测, 外标法定量, 并对常见谷物样品进行检测分析。**结果** 经方法学验证, 木糖、阿拉伯糖在 0.2~2.0 mg/mL 范围内线性关系良好, 决定系数均大于 0.999, 检出限分别为 1.0 mg/g、1.5 mg/g, 定量限分别为 2.5 mg/g、5.0 mg/g, 回收率为 86.8%~93.1%, 相对标准偏差均小于 3.5%。**结论** 该方法准确、可靠、灵敏, 适用于谷物中总阿拉伯木聚糖的测定, 可为谷物品质评价、加工适应性分析及膳食营养研究提供参考。

**关键词:** 总阿拉伯木聚糖; 谷物; 微波消解; 高效液相色谱法; 蒸发光散射法

## Determination of total arabinoxylan content in cereals by microwave digestion-high performance liquid chromatography-evaporative light scattering detection

WANG Rui-Qing, JIN Ke-Ting, LI Xi, LEI Xin-Yu, ZHONG Ling-Li*
(*Institute of Quality Standard and Testing Technology Research*, *Sichuan Academy of Agricultural Sciences*, *Chengdu* 610066, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the determination of total arabinoxylan content in cereals by microwave digestion-high performance liquid chromatography-evaporative light scattering detection. **Methods** Following digestion with 1.0 mol/L trifluoroacetic acid at 120 ℃ for 30 min, the samples were de-acidified, re-dissolved and subsequently analyzed. Separation was performed on an $NH_2$ chromatographic column (4.6 mm× 250 mm, 5 μm) with isocratic elution using acetonitrile-water (90:10, *V*:*V*) as the mobile phase. Detection was conducted using an evaporative light scattering detection, quantification was performed by the external standard method, and the developed method was applied to the analysis of common cereal samples. **Results** After

**收稿日期:** 2026-03-10
**第一作者:** 王瑞清(1988—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: 361289383@qq.com
***通信作者:** 仲伶俐(1982—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: 17916029@qq.com

methodological verification, good linearity was observed for xylose and arabinose in the range of 0.2 to 2.0 mg/mL, with coefficient of determination exceeding 0.999. The limits of detection were 1.0 mg/g for xylose and 1.5 mg/g for arabinose, and the corresponding limits of quantitation were 2.5 mg/g and 5.0 mg/g. Recoveries ranged from 86.8% to 93.1% (relative standard deviation all less than 3.5%). **Conclusion** The method is accurate, reliable and sensitive, making it suitable for the determination of total arabinoxylan in cereals and providing a reference for cereal quality evaluation, processing adaptability analysis and dietary nutrition research.

**KEY WORDS:** total arabinoxylan; cereals; microwave digestion; high performance liquid chromatography; evaporative light scattering detection

## 0 引 言

阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX), 又名戊聚糖, 是一种广泛存在于谷物中的非淀粉多糖, 由木糖主链和阿拉伯糖侧链构成, 是植物半纤维素的主要成分之一[1−2]。相关研究表明, AX 作为谷物的第二大结构多糖, 不仅决定了谷物的加工特性, 还具备降血糖、降血脂、抗氧化、免疫调节、益生元等多种生理功能[3−4]; 在生物医药[5]、功能性食品[6]、化妆品[7]等领域展示出广泛的应用潜力, 已被中国、美国、欧盟、加拿大等批准成为一种可添加在食品或膳食补充剂中的新食品原料[8]。小麦、燕麦、玉米等谷物是 AX 的主要天然来源, 但 AX 含量在谷物的不同种类[9]、株系[10]、组织[9,11]和生长环境[12]中存在显著差异。由于谷物 AX 主要分布于糊粉层和谷皮层的细胞壁中, 其含量的高低往往也会受到加工方式和程度的影响[13]。因此, 建立高效样品前处理技术和准确的 AX 含量测定技术是谷物品质评价、功能研究和产业化应用等的重要前提。

由于 AX 水解后可以形成阿拉伯糖和木糖两种主要单糖, 其含量通常是基于水解形成的阿拉伯糖和木糖含量, 通过公式换算间接测定[14]。传统的酸解法一般采用强酸处理 120 min 以上, 水解效率低、耗时长[15]。微波消解技术作为样品高效前处理的重要手段, 具有加热效率高、消解速度快、试剂用量少、环境污染小等优势[16], 已在食品、环境、地质等领域得到广泛应用[17−19], 颉东妹等[20]将微波消解技术成功应用到多糖的水解与测定研究中, 进一步证明了微波消解在多糖检测中的优势和应用潜力。然而, 微波消解技术在谷物 AX 定量检测中的应用尚处于探索阶段, 其微波消解条件(功率、温度、时间)仍待深入研究。

AX 含量的分析检测方法主要包括比色法[21]、Duffau 蒸馏法[22]、气相色谱法[23]、离子色谱法[15]等。比色法操作简便、成本低、检测快, 适用于快速筛查, 但易受杂质干扰, 且仅能测总量, 重复性和准确度欠佳[21,24]。Duffau 蒸馏法是测定戊聚糖的传统化学方法, 在食品、生物等领域已有成熟应用, 但该方法会受到淀粉水解产物的干扰, 难以满足精准检测需求, 已逐步被替代[22,24]。衍生化气相色谱法(gas chromatography, GC)可分析单糖组成, 联用质谱可提升灵敏度, 但需确保衍生化完全, 且操作烦琐、耗时久、维护成本高[23,25]。离子色谱法灵敏度高、分离度好, 可同步测定多种单糖, 适配复杂基质, 但糖分析柱昂贵, 灵敏度受氢氧根浓度影响, 实验室普及受限[15,26]。高效液相色谱仪(high performance liquid chromatography, HPLC)与蒸发光散射检测器(evaporative light scattering detection, ELSD)联用, 在糖类物质检测中具有操作简便、快速、灵敏、准确的优势, 可有效适配复杂样品基质的检测需求[27−28]。

目前, 将微波消解与 HPLC-ELSD 结合测定谷物中总 AX 含量的研究鲜有报道, 缺乏系统的方法学验证和应用评价。本研究结合微波消解前处理在促进多糖降解为单糖的效率和稳定性优势以及 ELSD 在糖类检测的灵敏度和梯度兼容性优势, 建立了 AX 的微波消解-HPLC-ELSD 检测方法, 通过对消解条件、色谱分离条件和检测参数的系统优化, 验证了该方法的可靠性和准确性, 并将其应用于常见谷物样品的实际检测。研究结果将为谷物中 AX 提供绿色精准检测技术, 扩展液相色谱仪在 AX 检测中的技术应用, 为行业提供可靠的技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

黑青稞等 7 种谷物和麦麸均购自四川省成都市农贸市场。

*D*-木糖、*D*-果糖、*D*-无水葡萄糖标准物质(纯度分别为 99.6%、99.5%、99.7%, 批号为 B0002837、H3009050、H3009093, 北京曼哈格生物科技有限公司); *L*-阿拉伯糖标准物质(纯度 98.1%, 批号为 23090382, 坛墨质检科技股份有限公司); 三氟乙酸(trifluoroacetic acid, TFA)(分析纯)、乙腈(色谱纯)(上海安谱实验科技有限公司); 试验用水采用 Milli-Q IQ 7005 超纯水仪制备。

### 1.2 仪器与设备

e2695 高效液相色谱仪(美国 Waters 公司); ELSD 6000 蒸发光散射检测器[美国奥泰科技(中国)有限公司]; TOPEX 微波消解仪(上海屹尧科技发展有限公司);

AUY220 分析天平(精度 0.1 mg, 北京宏大博宇科技有限公司); Neofuge 18R 多功能冷冻离心机(上海力中科学仪器有限公司); EG37C 石墨数显电热板(广州博勒泰科技有限公司); Agilent Polaris $NH_2$ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm, 美国 Agilent 公司); Milli-Q IQ 7005 超纯水仪(美国 Millipore 公司)。

### 1.3　实验方法

1.3.1　标准溶液制备

精密称取经干燥至恒重的 *D*-木糖、*L*-阿拉伯糖、*D*-果糖、*D*-葡萄糖标准品各约 100 mg, 分别置于 10 mL 容量瓶中, 加水适量使溶解并定容, 摇匀, 即得 10 mg/mL 的单糖标准品储备溶液。临用前用 60%乙腈稀释成 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 mg/mL 的混合标准工作溶液。

1.3.2　HPLC 条件优化

以 Agilent Polaris $NH_2$ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)进行分析; 以乙腈-水(90:10, *V*:*V*)为流动相; 流速 1.0 mL/min; 柱温 35 ℃; 进样量 5.0 μL。ELSD 漂移管温度 74 ℃, 载气($N_2$)流量 1.8 L/min。

1.3.3　样品前处理条件优化

微波消解温度优化试验: 精密称取 0.2 g 黑青稞样品, 加入 10 mL TFA 溶液(2.0 mol/L), 不同微波温度(80、100、120、140、160 ℃), 消解 60 min。

微波消解时间优化试验: 精密称取 0.2 g 黑青稞样品, 加入 10 mL TFA 溶液(2.0 mol/L), 温度 120 ℃, 消解不同时间(10、20、30、40、50、60、90、120 min)。

TFA 酸度优化试验: 精密称取 0.2 g 黑青稞样品, 加入 10 mL TFA 溶液(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mol/L), 120 ℃, 微波消解 30 min。

微波消解后, 冷却至室温, 过滤, 取 1.0 mL 滤液于小烧杯中, 95 ℃蒸干, 加水洗涤, 蒸干, 重复洗涤 3~4 次至 TFA 蒸发完全, 用 1.0 mL 60%乙腈溶解, 摇匀后经微孔滤膜过滤, 获得供试样品溶液, 并通过 HPLC 检测, 筛选最佳消解条件。

1.3.4　谷物样品测定

精密称取 0.2 g 不同谷物试样, 参照 1.3.3 优化后的条件进行样品前处理, 1.3.2 的 HPLC 条件进样测试。同时依据 NY/T 2335—2013《谷物中戊聚糖含量的测定 分光光度法》, 对上述谷物样品进行同步测定。以标准品峰面积的幂函数为纵坐标(*Y*), 浓度的幂函数为横坐标(*X*), 绘制标准曲线, 得线性回归方程, 根据标准曲线得到样品中各单糖的浓度。样品戊聚糖含量=(阿拉伯糖含量+木糖含量)×0.88[14]。

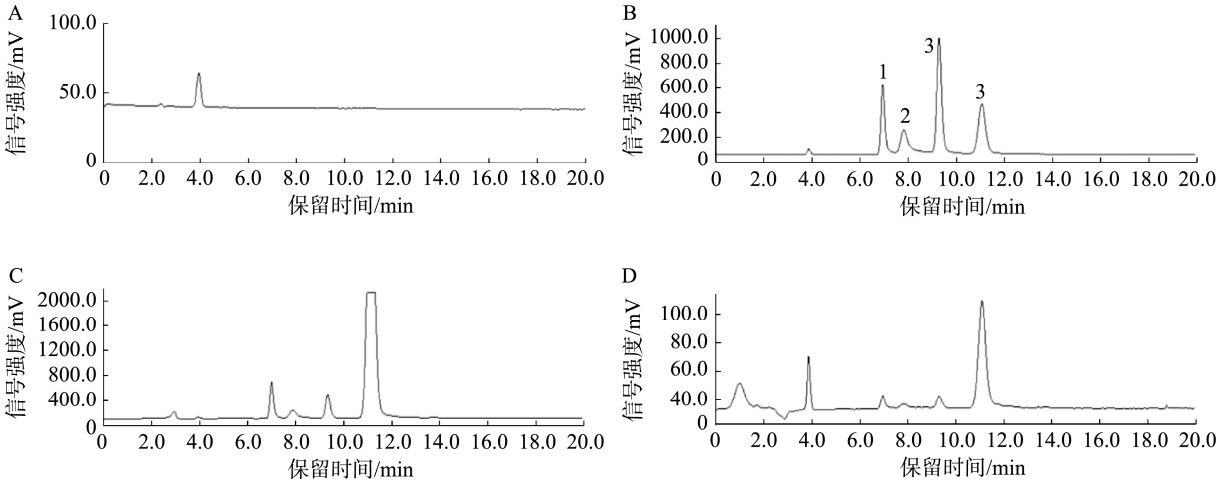
### 1.4　数据处理

采用 GraphPad Prism 8 在 $P<0.05$ 水平下进行统计分析并绘图; 数据以均值和标准差呈现, 并基于 Tukey's 多重比较检验进行多组数据间的差异显著性分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　色谱条件优化分析

HPLC 分析糖类化合物一般使用的流动相为乙腈和水, 氨基柱在分离单糖时, 随着乙腈比例的增加, 单糖保留增强。调整乙腈和水的比例, 乙腈由 80%增加至 92%, 由于水解液中葡萄糖的含量很高, 为了排除葡萄糖对其他单糖检测的影响, 在乙腈占比 90%时, 木糖、阿拉伯糖、果糖、葡萄糖获得较好的分离度, 达到检测标准。ELSD 的漂移管温度(74 ℃)和氮气流速(1.8 mL/min)均按照仪器说明进行设置和优化, 在此条件下, 噪音干扰较小。优化条件下, 溶剂空白、对照品溶液、样品溶液和稀释后的样品溶液色谱图见图 1。




注: 1. 木糖; 2. 阿拉伯糖; 3. 果糖; 4. 葡萄糖。

图 1　溶剂空白(A)、对照品溶液(B)、样品溶液(C)、稀释后的样品溶液(D)的 HPLC-ELSD 色谱图

Fig.1　HPLC-ELSD chromatograms of solvent blank (A), reference solution (B), sample solution (C) and diluted sample solution (D)

## 2.2 微波消解条件优化

### 2.2.1 不同微波温度和时间对总 AX 含量的影响

不同微波温度及时间对 AX 的消解效率影响见图 2。随着温度的升高，两种单糖的含量均呈先升后降的趋势：在 120 ℃时达到峰值，140 ℃时显著下降($P$<0.05)，至 160 ℃时已无法检出。这表明在水解体系中，微波辅助能有效促进细胞壁中 AX 的水解释放，该效率在 120 ℃时达到最佳；KATHARINA 等[29]的研究结果显示微波辅助 TFA 水解 AX 的效率呈现出明显的温度依赖性，同时酸性条件下高温会加速单糖脱水分解为糠醛及其他副产物，进而降低可回收的单糖得率。因此，微波消解温度选择 120 ℃。

微波消解时间对样品消解效率的影响相对较小；在 10~30 min过程中，随着消解时间的增加，木糖和阿拉伯糖的含量逐步上升，达到显著水平($P$<0.05)；在 30~120 min 过程中，木糖和阿拉伯糖的含量变化不显著($P$>0.05)；说明微波消解 30 min 可将样品中的 AX 完全降解为木糖和阿拉伯糖，为缩短检测周期，确保消解完全，将微波消解最优时间确定为 30 min。该优化方法较传统加热法(2~4 h)快 4~8 倍，且能实现相当或更高的单糖回收率，在 AX 的定量分析中体现出更优的检测效率。

### 2.2.2 TFA 酸浓度对总 AX 含量的影响

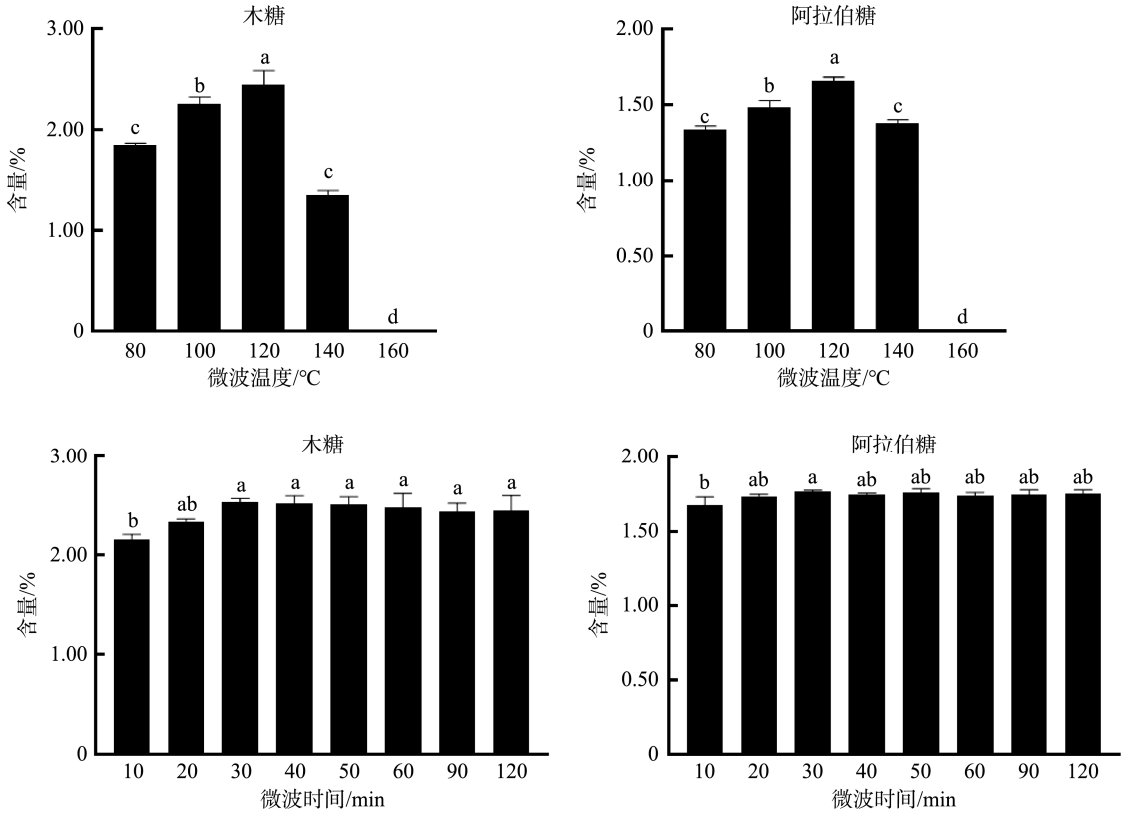
TFA 是多糖水解的首选试剂，其核心优势在于水解效率高、前处理简便、单糖回收率高，能够很好地满足多糖单糖组成分析与结构解析的研究需求[30–31]。

如图 3 所示，当 TFA 浓度为 1.0 mol/L 时，木糖和阿拉伯糖的含量均达到最高。经统计学分析，木糖含量在 0.5、1.0 和 1.5 mol/L 3 个浓度处理间无显著差异($P$>0.05)；而阿拉伯糖含量在 1.0 mol/L 时显著高于其他浓度($P$<0.05)。因此，选择 1.0 mol/L TFA 为最佳水解浓度。

## 2.3 方法学评价

### 2.3.1 线性范围与检出限、定量限

以标准溶液峰面积的对数为纵坐标($Y$)，浓度的对数为横坐标($X$)，绘制标准曲线，得线性回归方程，结果见表 1，木糖、阿拉伯糖的决定系数($R^2$)均大于 0.999，表明，在 0.2~2.0 mg/mL 范围内线性关系良好。将标准品和试剂空白的色谱信号峰进行比较，以信噪比约 3:1 时的浓度为 LODs，信噪比 10:1 时的浓度为 LOQs。木糖、阿拉伯糖的 LODs 分别为 1.0 mg/g、1.5 mg/g; LOQs 分别为 2.5 mg/g、5.0 mg/g，可满足谷物中戊聚糖含量的检测要求。




注：不同字母表示组间具有显著性差异($P$<0.05)，下图同。

图 2 不同微波温度和时间对 AX 含量测定的影响($n$=3)

Fig.2 Effects of different microwave temperatures and time on the determination of AX content ($n$=3)

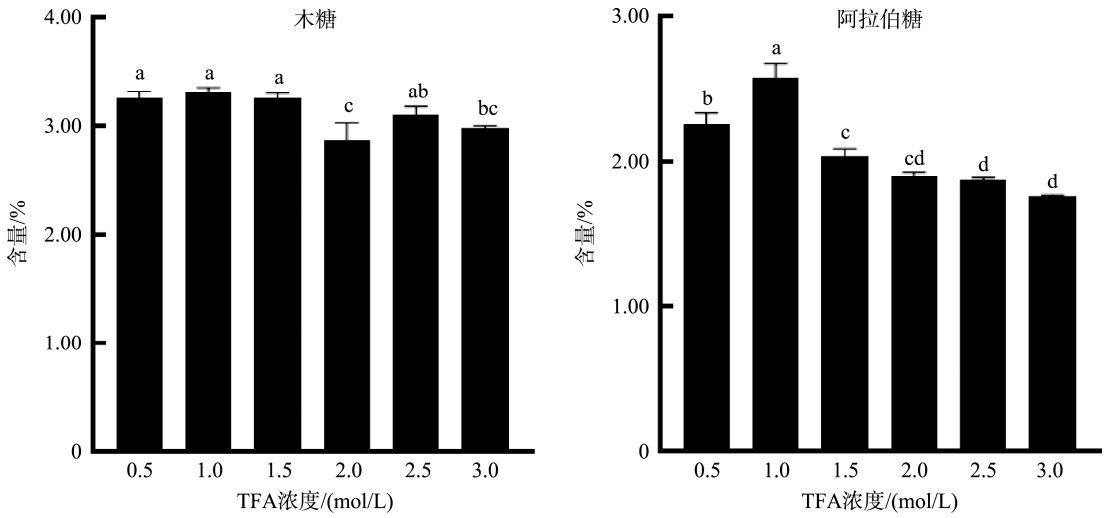



图 3　TFA 浓度对 AX 含量测定的影响($n$=3)

Fig.3　Effects of TFA concentration on the determination of AX content ($n$=3)

**表 1　木糖和阿拉伯糖的线性方程、LODs 和 LOQs**

**Table 1　Regression equations, LODs and LOQs of xylose and arabinose**

| 目标物 | 线性方程 | $R^2$ | 线性范围/(mg/mL) | LODs/(mg/g) | LOQs/(mg/g) |
|---|---|---|---|---|---|
| 木糖 | $Y$=0.7134$X$–4.8750 | 0.9991 | 0.2~2.0 | 1.0 | 2.5 |
| 阿拉伯糖 | $Y$=0.7245$X$–4.7883 | 0.9990 | 0.2~2.0 | 1.5 | 5.0 |

注: 检出限(limits of detection, LODs); 定量限(limits of quantitation, LOQs)。

2.3.2　精密度、稳定性与准确度

取供试品溶液 5 μL, 注入 HPLC 检测, 重复进样 6 次, 测得木糖和阿拉伯糖的峰面积, 得到木糖和阿拉伯糖峰面积的相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)分别为 1.0%和 1.9%, 表明仪器精密度良好。

取供试品溶液 5 μL, 在 0、2、4、6、8、12、16、20、24 h, 注入 HPLC 检测, 得到木糖和阿拉伯糖峰面积的 RSDs 分别为 1.0%和 1.2%, 表明进样溶液的稳定性良好。

取青稞样品 0.2 g, 加入一定量的木糖、阿拉伯糖标准品溶液, 制备供试品溶液, 测得木糖、阿拉伯糖的峰面积, 计算回收率, 结果见表 2。木糖和阿拉伯糖的回收率范围分别为 90.9%~93.1%、86.8%~92.8%, RSDs 分别为 1.5%和 3.4%, 表明方法准确度和精密度良好。

## 2.4　不同谷物的总 AX 含量测定

选取小麦、黑青稞、玉米、荞麦、燕麦等代表性谷物进行总 AX 含量测定, 结果见表 3。由结果可知, 供试谷物中总 AX 含量与文献报道基本一致: 青稞、小麦、玉米、荞麦和燕麦总 AX 含量较高, 约为 4.0%~6.0%; 高粱和稻米总 AX 含量较低, 约 0.5%, 且阿拉伯糖含量低于 LOD; 麦麸总 AX 含量为 13.16%。采用 NY/T 2335—2013 比色法同步检测的结果整体高于本研究方法, 推测可能是比色法的检测结果易受样品中杂质的干扰, 导致测定值偏高。从文献数据上看, 同一种谷物的总 AX 含量存在明显的波动, 这与品种、生长环境及加工方法有关[10–13], 也有可能由检测手段的差异引起; 提示在比较谷物总 AX 含量时, 需要提供准确、详细的样品信息和检测手段, 提高结果的可靠性和可比性。

**表 2　木糖和阿拉伯糖的回收率($n$=6)**

**Table 2　Recoveries of xylose and arabinose ($n$=6)**

| 化合物 | 本底值/mg | 加入量/mg | 测得值/mg | 回收率/% | 平均回收率/% | RSDs/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 木糖 | 6.576 | 1.5 | 7.940 | 90.9 | 91.5 | 1.5 |
| | | 2.5 | 8.841 | 90.6 | | |
| | | 5.0 | 11.230 | 93.1 | | |
| 阿拉伯糖 | 5.052 | 1.5 | 6.383 | 88.7 | 89.4 | 3.4 |
| | | 2.5 | 7.371 | 92.8 | | |
| | | 5.0 | 9.394 | 86.8 | | |

表 3 不同谷物的总 AX 含量(*n*=3)

Table 3 Total AX content of different cereals (*n*=3)

| 样品名称 | 木糖含量/% | 阿拉伯糖含量/% | 取代度(A/X) | 总 AX 含量/% | 比色法测定含量/% | 参考文献含量/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 黑青稞 | 3.32 | 2.58 | 0.77 | 5.19 | 6.49 | 3.5~6.0[32] |
| 小麦 | 3.33 | 2.10 | 0.63 | 4.78 | 6.04 | 4.1~6.0[33] |
| 玉米 | 3.26 | 2.39 | 0.73 | 4.97 | 4.82 | 3.8~5.2[24,29] |
| 荞麦 | 4.20 | 1.14 | 0.26 | 4.70 | 5.72 | 3.4~11.4[34] |
| 燕麦 | 2.89 | 2.21 | 0.76 | 4.49 | 5.22 | 2.2~4.1[33] |
| 高粱 | 0.64 | - | - | 0.56 | 1.10 | 1.0[35] |
| 稻谷 | 0.62 | - | - | 0.55 | 1.70 | 0.3~1.0[24,29] |
| 麦麸 | 8.38 | 6.57 | 0.78 | 13.16 | 14.26 | 10.9~30.0[36] |

注: -代表未检出; 取代度(A/X)表示木糖主链被阿拉伯糖侧链取代的程度, A 代表阿拉伯糖, X 代表木糖。

## 3 讨论与结论

谷物是我国居民日常饮食的重要组成, AX 作为谷物细胞壁多糖的重要组成部分, 其含量与谷物中总膳食纤维含量之间有强相关性, 是评价谷物产品品质高低的重要指标[37−38]; 开发高效、准确的谷物 AX 检测方法, 可以为高品质谷物食品尤其是全谷物食品的鉴别和开发利用提供重要支撑。本研究建立了微波消解-HPLC-ELSD 法测定谷物中总 AX 含量, 明确了谷物样品的最佳微波消解条件为水解温度 120 ℃, 水解时间为 30 min, TFA 浓度为 1.0 mol/L。相比于 NY/T 2335—2013, 本研究采用的 HPLC-ELSD 法, 检测灵敏且特异性强, 可减少其他单糖的干扰, 保证了检测的准确性。

样品酸水解是 AX 检测的重要前处理过程, 样品的水解效果以及单糖形成的稳定性直接影响 AX 含量测定的准确性[39]。常用的酸解液包括硫酸、盐酸、TFA 等, 其中 TFA 水解条件温和, 能高效水解糖苷键, 由于它易挥发, 水解后可通过加热或旋转蒸发方便地去除, 无需中和步骤, 避免了盐分对色谱柱的损伤或引入额外峰, 是目前多糖分析中最常用的酸之一。本研究也发现以 TFA 为酸解液在微波消解 30 min 后木糖和阿拉伯糖的含量便不再发现显著变化, 这与 HARAZONO 等[40]的研究结果相类似, 表明 TFA 作为酸解液可以有效避免“过度水解”破坏单糖而导致测定结果不准确的情况。微波辅助消解利用微波直接加热极性分子, 在密闭高压环境中加速反应, 已成功在牛乳中糠氨酸检测[41]、枸杞多糖含量检测[20]等过程中得到应用。将前处理时间从传统的 2 h[15,42]缩短到了 30 min, 显著提高了谷物 AX 检测的前处理效率。

糖类化合物分子结构中缺乏发色基团, 无法直接用传统的 HPLC-光电二极管阵列检测器检测, 需要经过复杂的衍生处理过程, 限制了 HPLC 在多糖检测中的应用[43]。本研究采用 ELSD 不依赖物质的光学性质[44], 直接检测谷物 AX 经微波消解后的木糖和阿拉伯糖, 进一步对建立的 HPLC-ELSD 方法进行了系统的方法学验证。结果表明, 木糖和阿拉伯糖的 LODs 分别为 1.0 mg/g、1.5 mg/g, LOQs 分别为 2.5 mg/g、5.0 mg/g, 回收率为 86.8%~93.1%, RSDs 均小于 3.5%。本研究为谷物中总 AX 的含量分析提供了新的方法学参考, 也为谷物营养品质评价和加工特性研究提供技术支撑。

## 参考文献


[1] 陈光, 吕江涛, 邱学良, 等. 阿拉伯木聚糖关键制备工艺及其应用[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(11): 20–30.
CHEN G, LV JT, QIU XL, *et al*. Key preparation processes and applications of arabinoxylan [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2024, 59(11): 20–30.

[2] CHEN Z, LI S, FU Y, *et al*. Arabinoxylan structural characteristics, interaction with gut microbiota and potential health functions [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 536–551.

[3] TSE T, SCHENDEL RR. Cereal grain arabinoxylans: Processing effects and structural changes during food and beverage fermentations [J]. Fermentation, 2023, 9(10): 914.

[4] 张明慧, 许蝶, 龙宇翔, 等. 阿拉伯木聚糖开发应用研究进展[J]. 农产品加工, 2024(11): 8–14.
ZHANG MH, XU D, LONG YX, *et al*. Advances in development and application of arabinoxylan [J]. Farm Products Processing, 2024(11): 8–14.

[5] OOI LS, MICALOS SP, KIM J, *et al*. Rice bran arabinoxylan compound as a natural product for cancer treatment-an evidence-based assessment of the effects and mechanisms [J]. Pharmaceutical Biology, 2024, 62(1): 367–393.

[6] INAH G, SHUN LW, DAYA M, *et al. In vitro* fecal fermentation patterns of arabinoxylan from rice bran on fecal microbiota from normal-weight and overweight/obese subjects [J]. Nutrients, 2021, 13(6): 2052.

[7] KOBAYASHI K, SUZAUDDULA M, BENDER R, *et al*. Functional properties and potential applications of wheat bran extracts in food and cosmetics: A review of antioxidant, enzyme-inhibitory, and anti-aging benefits [J]. Foods, 2025, 14(3): 515.

[8] 新食品原料新星阿拉伯木聚糖正冉冉升起[N]. 中国食品报, 2024-08-26 (006).
Arabinoxylan: A rising star in novel food ingredients [N]. China Food News, 2024-08-26 (006).

[9] EMANUELE Z, ÁNGELA BN, AYLIN WS, *et al*. Arabinoxylans as functional food ingredients: A review [J]. Foods, 2022, 11(7): 1026.

[10] SZENTMIKLÓSSY M, TÖRÖK K, PUSZTAI É, *et al*. Variability and cluster analysis of arabinoxylan content and its molecular profile in crossed wheat lines [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103074.

[11] JOSÉ ZA, AISHWARYA T, ROYA RRS, *et al*. Characterization of high arabinoxylan oat lines identified from a mutagenized oat population [J]. Food Chemistry, 2022, 404: 134687.

[12] MAILIIS K, MAARIKA A, INDREK K, *et al*. The influence of cropping system, weather conditions and genotype on arabinoxylan content in wheat and barley grains [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 110: 103650.

[13] NDEGWA HM, ANNE R, YAMINA DB, *et al*. Process-induced changes in the quantity and characteristics of grain dietary fiber [J]. Foods, 2021, 10(11): 2566.

[14] 孙军勇, 陆健. 大麦麦芽阿拉伯木聚糖的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 261–267.
SUN JY, LU J. Research advances on arabinoxylan in barley malt [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(5): 261–267.

[15] 刘晓莹, 马璐瑶, 王力, 等. 基于高效阴离子色谱-脉冲安培法优化阿拉伯木聚糖单糖组成分析[J]. 分析化学, 2017, 45(3): 416–422.
LIU XY, MA LY, WANG L, *et al*. Monosaccharide composition analysis of arabinoxylan by high performance anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(3): 416–422.

[16] BIZZI CA, PEDROTTI MF, SILVA JS, *et al*. Microwave-assisted digestion methods: Towards greener approaches for plasma-based analytical techniques [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2017, 32(8): 1448–1466.

[17] 玛依拉·阿布都克力木. 样品前处理在食品理化检验中的应用分析[J]. 食品安全导刊, 2020(18): 188.
MAYILA ABDKLM. Analysis of the application of sample pretreatment in physical and chemical inspection of food [J]. Journal of Food Safety Guide, 2020(18): 188.

[18] 鹿传磊, 张元, 谢旭, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地表基质调查样品中的多元素[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(12): 1995–2003.
LU CL, ZHANG Y, XIE X, *et al*. Determination of multiple elements in ground substrate survey samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with microwave digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(12): 1995–2003.

[19] 谢旭, 卢兵, 赵文志, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定黑土地地表基质调查样品中碘[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(7): 980–985.
XIE X, LU B, ZHAO WZ, *et al*. Determination of iodine in black soil surface matrix survey samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with microwave digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(7): 980–985.

[20] 颉东妹, 王宁丽, 刘笑笑, 等. 微波消解-离子色谱法测定枸杞多糖的含量及组成[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1065–1072.
XIE DM, WANG NL, LIU XX, *et al*. Determination of the content and composition of *Lycium barbarum* polysaccharides by microwave digestion-ion chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(4): 1065–1072.

[21] 李利民, 朱永义, 姚惠源. 谷物中戊聚糖含量测定方法的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2004(6): 76–79, 87.
LI LM, ZHU YY, YAO HY. Comparative study of different determination methods for cereal pentosans [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2004(6): 76–79, 87.

[22] 韩秀丽, 张如意, 马晓建, 等. Duffau 蒸馏法测定谷朊粉生产废水中的戊聚糖[J]. 食品科学, 2007(3): 265–267.
HAN XL, ZHANG RY, MA XJ, *et al*. Duffau distillation method for pentosans assay in wheat glutenin processing waste water [J]. Food Science, 2007(3): 265–267.

[23] 刘刚, 王辉, 周建, 等. 柱前衍生化毛细管气相色谱法分析松茸多糖的单糖组成[J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(21): 62–64.
LIU G, WANG H, ZHOU J, *et al*. Analysis of monosaccharides composition in polysaccharide of *Tricholoma matsutake* by precolumn derivatization and capillary gas chromatography [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2011, 17(21): 62–64.

[24] 冯波, 舒守贵, 张爱民, 等. 麦类作物种子中戊聚糖研究进展[J]. 植物学通报, 2006(2): 215–223.
FENG B, SHU SG, ZHANG AIM, *et al*. Research progress on pentosan in triticeae crops [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2006(2): 215–223.

[25] 贺永惠, 王清华, 刘长忠, 等. 乙酸酐衍生化气相色谱法测定小麦非淀粉多糖的单糖组成[J]. 光谱实验室, 2009, 26(4): 1039–1042.
HE YH, WANG QH, LIU CZ, *et al*. Determination of monosaccharide components in wheat bran non-starch polysaccharides by gas chromatography with aiditol acetates derivatives [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2009, 26(4): 1039–1042.

[26] 欧云付, 尹平河, 赵玲. 半叶马尾藻粗糖中单糖的离子色谱法分析[J]. 色谱, 2006, 24(4): 411–413.
OU YF, YIN PH, ZHAO L. Determination of monosaccharides in *Sargassum hemiphyllum* (turner) C. Ag. polysaccharides by ion chromatography [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2006, 24(4): 411–413.

[27] 刘宇, 邢家溧, 沈坚, 等. 高效液相色谱-蒸发光散射检测法同时测定固态食品中 6 种稀有糖[J]. 色谱, 2023, 41(9): 781–788.
LIU Y, XING JL, SHEN J, *et al*. Simultaneous determination of six rare sugars in solid foods by high performance liquid chromatography-evaporative light-scattering detection [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2023, 41(9): 781–788.

[28] SOYSEVEN M, SEZGIN B, ARLI G. A novel, rapid and robust HPLC-ELSD method for simultaneous determination of fructose, glucose and sucrose in various food samples: Method development and validation [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104400.

[29] KATHARINA H, ULRICH S, STEFAN S, *et al*. Optimization and validation of arabinoxylan quantification in gluten-free cereals via HPAEC-PAD based on design of experiments [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(15): 9309–9319.

[30] ALYASSIN M, KADERI SI, CAMPBELL GM, *et al*. Arabinoxylans from the distillers grains and solubles co-products of ethanol production: Extraction, characterisation and hydrolysis to oligosaccharides [J]. Clean Technologies, 2026, 8(1): 24.

[31] CHU K, JIANG K, JIN Y. Study on the degradation patterns and structure-activity relationship of wheat arabinoxylan hydrolysate by wheat malt $\beta$-1,4-endoxylanase [J]. Foods, 2026, 15(4): 738.

[32] IZYDORCZYK MS, DEXTER JE. Barley beta-glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties and uses in food products-a review [J]. Food Research International, 2008, 41(9): 850–868.

[33] DÖRING C, JEKLE M, BECKER T. Technological and analytical methods for arabinoxylan quantification from cereals [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 56(6): 999–1011.

[34] 徐智斌, 张宗文, 王安虎, 等. 西南地区部分苦荞麦资源种子中戊聚糖含量的测定[J]. 种子, 2008, 27(5): 23–25.
XU ZB, ZHANG ZW, WANG ANH, *et al*. Assay of pentosan content in tartary buckwheat from Southwest China [J]. Seed, 2008, 27(5): 23–25.

[35] 辛瑞璞. 谷物中戊聚糖含量测定方法[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
XIN RP. The determination of pentosans in cereal [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.

[36] 龙志礼, 刘小郡, 李坚强, 等. 麦麸的营养组分及功能性成分的提取[J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 28–32.
LONG ZL, LIU XJ, LI JQ, *et al*. Extraction of nutritional components and functional components of wheat bran [J]. Grain Processing, 2021, 46(5): 28–32.

[37] 王立, 司晓静, 钱海峰, 等. 阿拉伯木聚糖对谷物食品的品质影响研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(7): 12–20.
WANG L, SI XJ, QIAN HF, *et al*. Research progress of effects of arabinoxylan on the quality of cereals [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(7): 12–20.

[38] ROSICKA-KACZMAREK J, KOMISARCZYK A, NEBESNY E, *et al*. The influence of arabinoxylans on the quality of grain industry products [J]. European Food Research and Technology, 2016, 242: 295–303.

[39] HE Y, ZHANG M, SHAN M, *et al*. Optimizing microwave-assisted hydrolysis conditions for monosaccharide composition analyses of different polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 327–332.

[40] HARAZONO A, KOBAYASHI T, KAWASAKI N, *et al*. A comparative study of monosaccharide composition analysis as a carbohydrate test for biopharmaceuticals [J]. Biologicals, 2011, 39(3): 171–180.

[41] 姚桂红, 梁超, 姚美伊, 等. 微波消解-高效液相色谱-串联质谱法定量检测牛乳中糠氨酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(13): 135–143.
YAO GH, LIANG C, YAO MY, *et al*. Quantitative detection of furosine in milk by microwave hydrolysis-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(13): 135–143.

[42] 李静, 李仁勇, 梁立娜. 毛细管型离子色谱-脉冲安培法检测枸杞多糖的单糖组成[J]. 分析化学, 2012, 40(9): 1415–1420.
LI J, LI RY, LIANG LN, *et al*. Determination of monosaccharide constituents in lycium barbarumpolysaccharide using capillary ion chromatography withpulsed amperometric detection [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012, 40(9): 1415–1420.

[43] 万强, 吴学昊, 范华军, 等. HPLC 衍生化法分析决明子多糖水解产物中单糖组分及其多糖组成特征的研究[J]. 分析测试学报, 2014, 33(11): 1231–1236.
WAN Q, WU XH, FAN HJ, *et al*. Derivative chromatographic analysis of monosaccharides in hydrolyzed polysaccharide from *Cassia obtus folia* L. and their composition characteristics [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2014, 33(11): 1231–1236.

[44] 张媛媛, 聂少平, 万成, 等. 高效液相色谱-蒸发光散射检测法同时测定单糖、双糖及低聚果糖[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 237–239.
ZHANG YY, NIE SP, WAN C, *et al*. Simultaneous HPLC-ELSD determination of monosaccharide, disaccharide and fructo-oligosaccharides [J]. Food Science, 2009, 30(18): 237–239.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)