

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240307008

不同产地小麦麸皮的主要活性成分测定及分析

严 欢, 毛琼玲, 王苗苗, 杨佳欣, 杨 中*

(新疆分析测试研究院, 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 目的 探究不同产地小麦麸皮的主要活性成分含量差异, 为小麦麸皮的后续研究提供理论基础。

方法 以国内不同产地 30 个小麦麸皮样品为研究对象, 测定其甜菜碱、多酚、烷基间苯二酚(alkylresorcinols, ARs)的含量, 利用聚类分析法对不同产地小麦麸皮活性成分的含量进行评价。**结果** 30 个小麦麸皮样品中, 甜菜碱含量范围在 $(10.82 \pm 0.09) \sim (27.28 \pm 0.50)$ $\mu\text{g/g}$; 多酚含量范围在 $(32354.79 \pm 26.44) \sim (73068.27 \pm 15.85)$ $\mu\text{g/g}$; 总烷基间苯二酚(总 ARs)含量范围在 $(511.05 \pm 1.02) \sim (2186.11 \pm 3.17)$ $\mu\text{g/g}$ 。聚类分析法将所有样品分为 3 类, 其中 5 号(新疆奇台县)被单独聚为一类, 其小麦麸皮中活性成分含量较为优异。**结论** 通过聚类分析得出 5 号样品(新疆奇台县)的小麦麸皮中活性成分含量相对较高, 该样品具有较大潜力, 可进一步开发相关功能性食品。

关键词: 小麦麸皮; 甜菜碱; 烷基间苯二酚; 聚类分析

Determination and analysis of main active ingredient of wheat bran from different origins

YAN Huan, MAO Qiong-Lin, WANG Miao-Miao, YANG Jia-Xin, YANG Zhong*

(Xinjiang Research Institute of Analysis and Testing, Xinjiang Key Laboratory of Featured Functional Food Nutrition and Safety Testing, Urumqi 830011, China)

ABSTRACT: Objective To explore the differences in the content of the main active ingredients of wheat bran from different origins, and to provide a theoretical basis for the subsequent research on wheat bran. **Methods** Thirty wheat bran samples from different origins in China were used to determine the contents of betaine, polyphenols, and alkylresorcinols (ARs), and to evaluate the contents of active ingredient in wheat bran from different origins using cluster analysis. **Results** Among the 30 wheat bran samples, betaine content ranged from (10.82 ± 0.09) to (27.28 ± 0.50) $\mu\text{g/g}$; polyphenol content ranged from (32354.79 ± 26.44) to (73068.27 ± 15.85) $\mu\text{g/g}$ of total alkyl resorcinols (total ARs) ranged from (511.05 ± 1.02) to (2186.11 ± 3.17) $\mu\text{g/g}$. Cluster analysis was used to classify all the samples into 3 categories, among which No.5 (Qitai County, Xinjiang) was clustered into a separate category, which had superior content of active ingredients in wheat bran. **Conclusion** Cluster analysis yielded a relatively high content of active ingredients in the wheat bran of sample No.5 (Qitai County, Xinjiang), which has a greater potential for further development of related functional foods.

基金项目: 2021 年自治区自然科学基金项目(面上项目)、新疆小麦麸皮功能性成分近红外光谱快速、无损检测方法研究项目(2021D01A140)

Fund: Supported by the 2021 Natural Science Foundation of the Autonomous Region (Surface Project), and the Rapid and Non-Destructive Detection Method of Functional Components of Wheat Bran in Xinjiang by Near Infrared Spectroscopy (2021D01A140)

*通信作者: 杨中, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测技术研究。E-mail: 893380184@qq.com

*Corresponding author: YANG Zhong, Professor, Xinjiang Research Institute of Analysis and Testing, Xinjiang Key Laboratory of Featured Functional Food Nutrition and Safety Testing, No.374, Science Second Street, Xinshi District, Urumqi 830011, China. E-mail: 893380184@qq.com

KEY WORDS: wheat bran; betaine; alkylresorcinols, cluster analysis

0 引言

小麦麸皮是小麦粒籽碾磨后的外层部分, 主要包括果皮、种皮、珠心层和糊粉层, 是小麦制粉过程中重要的副产物^[1-2], 约占原小麦粒重的 25%^[3-5]。通过查阅资料可知, 其含有多多种活性成分和膳食纤维等物质, 具有很大开发潜力^[6-7]。随着人们对健康饮食的追求, 小麦麸皮可用作功能性食品开发的优良原材料。

近年来, 由于不健康饮食导致肥胖而引发一系列疾病的现象多发且趋于年轻化, 通过查阅文献[8-11]可知, 在日常饮食中引入小麦麸皮可有效缓解体重增加。经研究表明^[12-15], 小麦麸皮中的甜菜碱可作为甲基供体合成肉碱, 肉碱进一步与酯酰辅酶 A 结合, 进入线粒体氧化脂肪酸, 抑制脂肪生成, 改善肥胖及相关代谢紊乱等症状。另外, 小麦麸皮中还含有能抑制低密度脂蛋白氧化, 预防心血管疾病的烷基间苯二酚(alkylresorcinols, ARs)^[16]以及能预防慢性病的多酚^[17]等活性成分。目前, 国内外对于小麦麸皮的研究主要集中在发酵、加工改性及成分测定等领域^[18-22], 对于活性成分的研究较少。近年来, 大量研究表明^[23-29]: ARs 作为小麦的生物标志物, 具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤、调节人体代谢以及调节肠道菌群等生物活性, 小麦麸皮中富含的多酚类物质及甜菜碱均有一定的降脂作用, 可有效预防高血脂引发的一系列相关疾病。

功能性食品的开发、活性成分的提取逐渐成为研究焦点, 小麦麸皮中富含膳食纤维和多种预防慢性病的活性成分。鉴于此, 本研究收集了全国不同产地的 30 个小麦麸皮样品, 对其进行了甜菜碱、ARs 和多酚类物质的含量测定, 通过聚类分析(cluster analysis, CA)对 30 个不同产地的小麦麸皮样品中的主要活性成分含量进行系统分析, 探究不同产地小麦麸皮的活性成分含量差异, 筛选出活性成分含量较高的样品, 以期小麦麸皮后续的研究与开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 材料

小麦麸皮: 均具有其固有的色泽、气味(无异味)、粉状(干燥松散, 无结块, 无霉变), 正常视力下无可见外来异物。分别粉碎, 过 80 目筛, 放置于阴凉通风处待用。具体信息见表 1。

1.1.2 试剂

甲醇(色谱纯)、乙腈(色谱纯)(德国 CNW Technologies 公司); 甲酸(色谱纯, 美国 SIGMA 公司); 没食子酸(纯度 98.81%, 批号: C8210100, 上海安谱实验科技有限公司);

甜菜碱(纯度 99.21%, 批号: ML210215-03, 美国 Stanford Chemicals 公司); 5-十七烷基间苯二酚(纯度≥98%, 批号: 41442-57-3, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 5-十九烷基间苯二酚(纯度≥98%, 批号: 35176-46-6)、5-二十三烷基间苯二酚(纯度≥98%, 批号: 70110-60-0)(云南西力生物技术股份有限公司); 5-二十一烷基间苯二酚(纯度 98.41%, 批号: 70110-59-7)、5-二十五烷基间苯二酚(纯度 99.08%, 批号: 70110-61-1)(美国 CFWLABS 公司); 其余试剂均系国产分析纯。

表 1 小麦麸皮样品产地及采集时间
Table 1 Origin and collection time of wheat bran samples

编号	产地	采集时间	编号	产地	采集时间
1	新疆伊宁县	2020.06.01	16	新疆库车县	2020.06.23
2	新疆尼勒克县	2020.06.03	17	新疆轮台县	2020.07.07
3	新疆阿克苏市	2020.06.06	18	新疆焉耆县	2020.07.07
4	新疆乌什县	2020.06.07	19	新疆莎车县	2020.07.07
5	新疆奇台县	2020.06.10	20	新疆麦盖提县	2020.07.07
6	新疆吉木萨尔县	2020.06.10	21	新疆喀什市	2020.07.07
7	新疆塔城市	2020.06.12	22	新疆伽师县	2020.07.07
8	新疆昌吉市	2020.06.23	23	新疆疏勒县	2020.07.07
9	新疆哈密市	2020.06.16	24	新疆泽普县	2020.07.07
10	新疆沙雅县	2020.06.23	25	山东荣成市	2020.10.21
11	新疆阿瓦提县	2020.06.23	26	甘肃陇南市	2020.10.25
12	新疆柯坪县	2020.06.23	27	陕西宝鸡市	2020.10.25
13	新疆拜城县	2020.06.23	28	河南柘城市	2020.10.29
14	新疆新和县	2020.06.23	29	河北邢台市	2020.11.07
15	新疆若羌县	2020.06.23	30	湖北荆门市	2020.11.07

1.1.3 仪器与设备

SQP PRACTUM612-1CN 电子天平(精度 0.1 mg, 德国 Sartorius 公司); MS3 Basic 涡旋混合器、T18 均质机(德国 IKA 公司); SK6200HP 功率可调超声波清洗器(美墨尔特贸易有限公司); Heraeus Fresco17 离心机、TSQ Quantis 高效液相-三重四极杆串联质谱联用仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); Agilent 1260 液相色谱仪、Agilent Eclipse plus C₁₈ 色谱柱(100 mm×4.6 mm, 3.5 μm, 美国 Agilent 公司); YMC-Triart C₁₈ 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 日本 YMC 公司); Waters BEH C₁₈ 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)、ACQUITY UPLC HSS T₃ 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm)、Waters BEH C₁₈ 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司); ExionLC AD 超高效液相仪(美国 AB Sciex 公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 甜菜碱含量测定方法

参考 T/SDAQI 040—2021《饲料中甜菜碱的测定 高效液相色谱法》。

样品处理: 分别精密称定小麦麸皮粉末 0.2 g 至 10 mL 比色管中, 加 70% 甲醇超声 30 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜至进样瓶中; 取 20 μL 加 70% 甲醇定容至 10 mL 即得处理后待测液。

标准品配制: 用 70% 甲醇配制质量浓度为 200 ng/mL 的甜菜碱标准品溶液。

液相色谱条件: 采用 TSQ Quantis 高效液相-三重四极杆串联质谱联用仪和 Waters BEH C_{18} 色谱柱(100 mm $\times$ 2.1 mm, 1.7 μm)进行检测。流动相 A 为乙腈, 流动相 B 为含 0.1% 甲酸水溶液, 梯度洗脱: 0.0~1.0 min, 5% B; 1.0~2.0 min, 5%~95% B; 2.0~4.5 min, 95% B; 4.5~5.1 min, 95%~5% B; 5.1~6.0 min, 5% B。柱温: 30 $^{\circ}\text{C}$, 自动进样器温度: 4 $^{\circ}\text{C}$, 进样体积: 10.00 μL , 流速: 0.3 mL/min。

质谱条件: 以多重反应监测(selected reaction monitoring, SRM)正离子模式(positive ion mode, POS)进行质谱分析。电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI)参数: 碰撞能量 21 V, 棱镜电压 66 V。离子喷射电压: +3500/-2500 V, 鞘气流: 35 Arb, 离子转移管温度: 325 $^{\circ}\text{C}$, 气化器温度: 350 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2 多酚测定方法

参考 T/AHFIA 005—2018《植物提取物及其制品中总多酚含量的测定 分光光度法》测定小麦麸皮中多酚的含量。

样品处理: 分别精密称定 2 g 小麦麸皮粉末, 加入 50 mL 70% 乙醇溶液, 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴提取 2 h, 取上清液得样品待测液。

标准品配制及标准曲线的绘制: 用 70% 乙醇溶液分别配制质量浓度为 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0 $\mu\text{g/mL}$ 的没食子酸标准品溶液, 根据标准品溶液的质量浓度(X)和测得的相应吸光度值(Y)绘制标准曲线。

多酚含量测定: 取 200 μL 样品待测液, 加入 4 mL 10% 碳酸钠溶液, 加入 0.8 mL 福林酚试剂, 加水定容至 10 mL, 混匀, 50 $^{\circ}\text{C}$ 避光反应 1 h, 在 765 nm 波长下测定吸光度值

(optical density, OD)。再根据标准曲线方程计算出小麦麸皮中多酚的含量。

1.2.3 ARs 测定方法

样品处理: 精密称定小麦麸皮粉末 10 mg 至 10 mL 比色管中, 加甲醇超声处理 30 min, 取上清过 0.22 μm 滤膜至进样瓶中。

标准品配制: 用甲醇配制质量浓度为 50 $\mu\text{g/mL}$ 的 ARs 混和标准品: 17-ARs、19-ARs、21-ARs、23-ARs、25-ARs。

液相色谱条件: 采用 Agilent 1260 高效液相色谱仪和 Agilent Eclipse plus C_{18} 色谱柱(100 mm $\times$ 4.6 mm, 3.5 μm)进行检测。流动相 A 为甲醇, 流动相 B 为含 0.1% 甲酸水溶液, 进行梯度洗脱: 0~4 min, 15% B; 4~8 min, 15%~5% B; 8~13 min, 5%~0% B; 13~34 min, 0% B; 34~35 min, 0%~15% B。检测波长: 280 nm, 柱温: 40 $^{\circ}\text{C}$, 自动进样器温度: 4 $^{\circ}\text{C}$, 进样体积: 10 μL , 流速: 0.500 mL/min。

1.3 数据处理

所有测定数据采用 Microsoft Excel 2016 进行统计、计算及部分图表的绘制, 所有数据重复测定 3 次, 数据采用平均值 $\pm$ 标准偏差表示。使用 Origin 2019 数据绘图分析软件进行色谱图的绘制, 使用软件 IBM SPSS Statistics 20.0 采用组间联接法进行聚类分析, 指标间的距离为欧氏距离, 绘制树状图。

2 结果与分析

2.1 甜菜碱含量

甜菜碱是一种在植物中广泛存在的天然产物, 该物质能抑制脂肪酸合成, 促进脂质氧化分解, 减缓脂肪的积累^[30-32]。甜菜碱系统适用性实验中空白、样品和标准品色谱图见图 1~2, 含量测定结果见表 2。实验结果表明, 来自不同产地的 30 个小麦麸皮样品中均含有甜菜碱, 部分产地小麦麸皮的甜菜碱的含量存在差异。由表 2 数据可知, 甜菜碱含量范围在(10.82 $\pm$ 0.09)~(27.28 $\pm$ 0.50) $\mu\text{g/g}$; 其中, 15 号样品(新疆若羌县)的小麦麸皮中甜菜碱的含量最高,

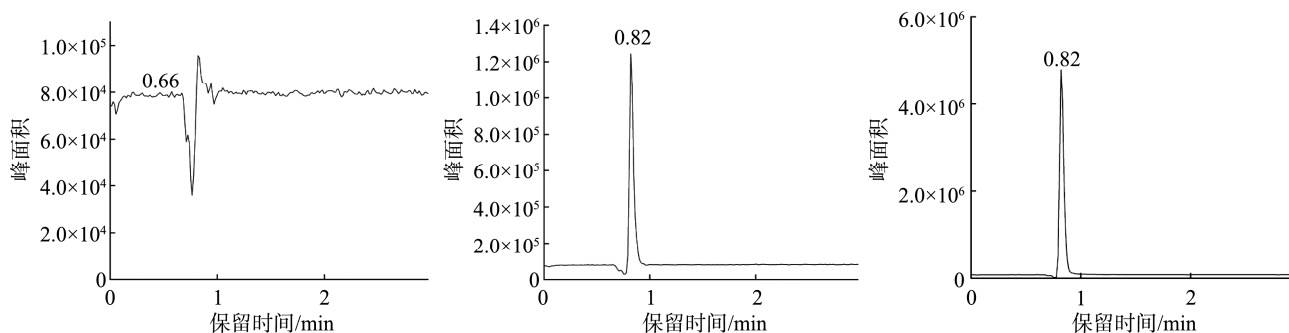


图 1 定量离子对(118.100/58.000)空白、标准品和样品色谱图

Fig.1 Chromatogram of quantitative ion pair(118.100/58.000)blank, standard and sample

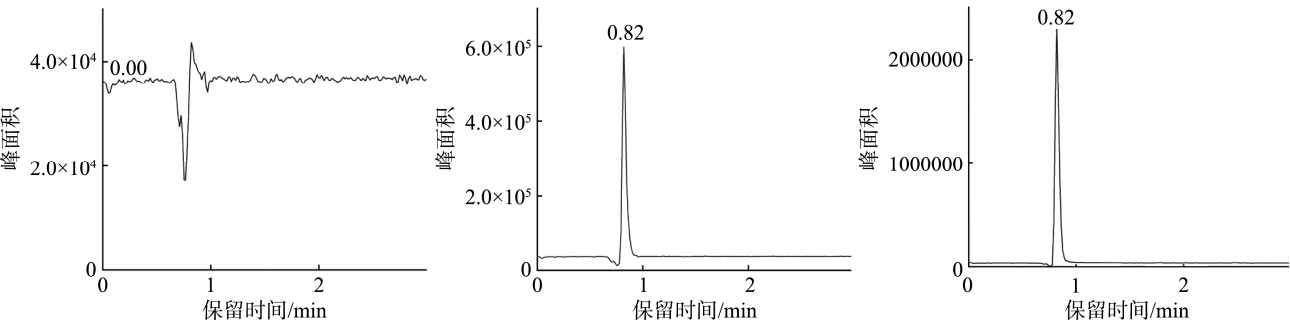


图 2 离子对(118.100/59.113)空白样品、标准品和样品色谱图
Fig.2 Chromatogram of ion pair (118.100/59.113) blank sample, standard and sample

表 2 甜菜碱含量(μg/g) Table 2 Content of betaine (μg/g)					
序号	甜菜碱含量	序号	甜菜碱含量	序号	甜菜碱含量
1	10.82±0.09	11	16.67±0.09	21	26.64±0.13
2	15.91±0.38	12	16.39±0.28	22	25.65±0.30
3	16.71±0.08	13	19.32±0.21	23	26.15±0.45
4	18.16±0.11	14	18.66±0.25	24	20.19±0.37
5	22.93±0.21	15	27.28±0.50	25	22.91±0.18
6	23.73±0.38	16	18.66±0.25	26	18.24±0.17
7	21.56±0.54	17	14.54±0.14	27	21.95±0.01
8	20.17±0.12	18	21.14±0.45	28	23.74±0.13
9	20.28±0.14	19	17.98±0.15	29	21.59±0.05
10	14.27±0.19	20	21.49±0.04	30	25.29±0.12

其次是 21 号样品(新疆喀什市)和 23 号样品(新疆疏勒县)的小麦麸皮中甜菜碱的含量也较高, 以上产地均为新疆南疆地区, 疆外的几个样品(25~30 号)中甜菜碱含量也较高, 但仍逊色于上述的新疆南疆产区, 而产地在新疆北疆的 1 号样品(新疆伊犁县)的小麦麸皮中甜菜碱的含量最低。

综上所述, 30 个样品中甜菜碱含量的大致趋势为: 新疆南疆> 疆外等地> 新疆北疆。推测可能是新疆南疆地区昼夜温差大, 日照时间长等环境因素利于小麦麸皮中甜菜碱的累积, 而北疆气候更为寒冷, 不利于小麦的生长导致其甜菜碱含量较低。

2.2 多酚含量

通过查阅研究结果可知, 谷物中多酚类物质具有抗炎、抗氧化的功效, 对心脑血管疾病的预防起着关键性的作用。对于轻度高血压患者, 可通过增加日常饮食中的多酚的含量来调节血压^[33-34]。多酚含量测定结果见表 3, 没食子酸标准曲线见图 3, 相关系数 $r^2=0.999$ 线性相关良好。得出 30 个小麦麸皮样品中的多酚含量, 结果见表 4。由表 4 可知, 不同产地的小麦麸皮中多酚含量在(32354.79±26.44)~(73068.27±15.85) μg/g, 其中 5 号样品(新疆奇台县)

表 3 不同浓度没食子酸标准品测定结果 Table 3 Test results of gallic acid standard with different concentrations					
序号	质量浓度/(μg/mL)	OD	序号	质量浓度/(μg/mL)	OD
1	0.1	0.0214	5	2.0	0.1077
2	0.2	0.0254	6	4.0	0.2085
3	0.5	0.0403	7	6.0	0.3233
4	1.0	0.0617	8	8.0	0.4173

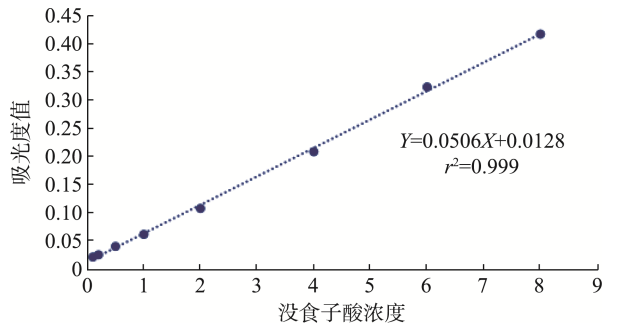


图 3 没食子酸标准曲线
Fig.3 Standard curve of gallic acid

表 4 多酚含量(μg/g) Table 4 Content of polyphenols (μg/g)					
序号	多酚	序号	多酚	序号	多酚
1	32354.79±26.44	11	47859.28±17.85	21	48425.95±19.23
2	35857.65±16.43	12	33357.68±14.72	22	49801.11±20.39
3	36324.26±23.77	13	56108.57±18.97	23	48893.69±19.29
4	47632.37±17.99	14	44427.19±20.75	24	45829.28±23.73
5	73068.27±15.85	15	55835.48±19.08	25	59228.57±22.38
6	53385.48±24.87	16	54987.85±20.87	26	46323.17±19.10
7	45579.74±24.52	17	39902.40±16.51	27	47612.49±21.98
8	36019.27±20.58	18	49837.41±20.83	28	43998.30±23.10
9	49147.58±19.87	19	48947.59±19.73	29	52287.19±23.72
10	54796.52±21.74	20	49702.58±18.54	30	43321.28±20.31

的小麦麸皮中的多酚含量最高, 25 号样品(山东荣成市)的次之, 1 号样品(新疆伊宁县)的小麦麸皮中多酚含量最低。

小麦麸皮中的多酚类物质通常以结合态通过酯键或醚键连接于细胞壁多糖^[28]。从检测结果可知, 30 个样品中多酚含量较高。含量整体趋势为: 北方产区 > 南方产区, 其中含量较高的产区多位于温带大陆性气候, 推测是该类气候干燥少雨、昼夜温差大等因素利于小麦麸皮细胞壁中多酚的积累。

2.3 ARs 含量

作为小麦麸皮的生物标志物, ARs 具有多种生理生物活性。不仅能抗菌抗氧化, 还能在短时间内高效率的被人体吸收, 将全谷小麦和黑麦引入日常饮食, 提高 ARs 的摄入量, 可有效降低患心脑血管疾病的风险^[35-36], 也可降低乳腺癌等发病^[37]。按照 1.2.3 方法测定 ARs 含量, 结果见表 5。不同产地的小麦麸皮中 C17-ARs 含量在(0.72±0.12)~

(45.92±0.59) $\mu\text{g/g}$; C19-ARs 含量在(71.81±0.39)~(433.97±4.57) $\mu\text{g/g}$; C21-ARs 含量在(314.41±3.29)~(1332.744±1.97) $\mu\text{g/g}$; C23-ARs 含量在(79.35±2.39)~(330.09±0.26) $\mu\text{g/g}$; C25-ARs 含量在(14.04±1.34)~(80.46±0.51) $\mu\text{g/g}$; 总 ARs 含量在(511.05±1.02)~(2186.11±3.17) $\mu\text{g/g}$, 其中 5 号样品(新疆奇台县)的小麦麸皮总 ARs 最高, 其次是 6 号样品(新疆吉木萨尔县)的小麦麸皮中 ARs 的含量也较高, 1 号样品(新疆伊宁县)的含量最低。

通过查阅文献可知^[38], 小麦中 ARs 的含量基本随小麦粒径的减小而减小, 因此粒径较大的小麦其麦麸中的 ARs 含量也较高。通过观察结果可知, 30 个样品 ARs 含量大致趋势为: 新疆北疆 > 疆外地区 > 新疆南疆。新疆奇台县、吉木萨尔县等天山北部地区, 位于新疆盆地腹地, 无山川丘陵, 光照充足, 加之沙壤土透气性好利于小麦吸收养分, 种植的小麦粒径大且饱满, ARs 含量也较高。

表 5 ARs 含量($\mu\text{g/g}$)
Table 5 Content of ARs ($\mu\text{g/g}$)

序号	C17-ARs	C19-ARs	C21-ARs	C23-ARs	C25-ARs	总 ARs
1	0.72±0.12	71.81±0.39	314.41±3.29	79.35±2.39	44.76±0.36	511.05±1.02
2	12.53±0.36	167.43±0.80	593.56±0.60	140.93±1.02	27.21±0.88	941.66±1.73
3	10.26±0.08	180.61±0.36	636.44±1.90	141.87±0.83	34.78±0.51	1003.97±3.52
4	26.56±2.93	300.27±8.55	979.06±1.29	218.74±0.30	61.21±0.59	1585.84±7.19
5	45.92±0.59	433.97±4.57	1314.96±8.43	330.09±0.26	61.17±1.02	2186.11±3.17
6	37.34±1.16	355.03±8.29	1332.744±1.97	289.46±0.16	66.80±0.29	2081.37±5.31
7	28.31±0.42	281.86±0.50	1038.75±7.13	249.53±1.39	55.73±0.12	1654.17±8.56
8	18.69±0.46	268.79±8.99	849.31±0.42	228.12±0.50	53.48±0.32	1418.40±10.71
9	30.39±4.03	326.91±4.39	1223.32±10.13	291.68±0.90	70.20±0.12	1942.50±8.99
10	10.81±0.14	165.48±0.08	597.90±0.98	147.48±0.88	34.74±0.71	956.42±1.08
11	17.01±0.08	239.26±5.96	804.84±0.66	196.44±1.63	48.80±0.94	1306.34±6.06
12	9.06±0.26	161.66±0.77	591.31±0.20	149.90±0.35	29.38±0.39	941.31±0.26
13	30.47±4.24	309.83±0.61	1071.35±0.67	262.54±1.51	65.34±0.24	1739.53±5.44
14	18.89±2.07	268.89±4.31	971.90±1.24	270.73±0.20	61.30±0.26	1591.71±7.78
15	21.20±0.12	323.06±4.02	1219.04±0.42	317.66±0.79	80.46±0.51	1961.42±4.85
16	11.67±0.10	198.93±3.22	797.99±1.36	170.39±0.87	42.15±0.22	1221.13±5.56
17	6.91±0.30	136.81±0.67	467.51±0.20	140.54±1.19	21.73±0.00	773.50±1.37
18	17.46±0.57	250.60±0.59	874.49±0.88	210.32±0.86	51.62±0.49	1404.49±0.49
19	13.20±0.10	215.92±0.24	896.66±3.75	212.20±0.67	51.62±0.96	1388.60±4.18
20	19.99±0.14	256.73±2.02	1058.22±1.08	254.16±1.68	62.70±0.22	1651.79±4.41
21	15.87±1.00	265.16±20.83	938.75±0.38	210.08±1.69	51.68±0.22	1481.54±17.98
22	29.65±0.42	282.80±0.20	1154.73±1.77	242.56±2.31	74.65±2.45	1784.38±0.92
23	21.05±0.18	285.79±3.42	1153.89±1.33	247.20±1.47	69.66±0.06	1777.59±3.52
24	8.84±0.14	172.91±0.08	771.88±0.04	192.38±0.38	45.05±0.46	1191.06±0.02
25	2.80±0.08	123.78±0.26	443.09±1.04	90.78±2.19	21.25±0.12	681.70±3.17
26	3.85±0.16	88.53±0.75	418.82±1.67	95.55±0.59	14.04±1.34	620.51±3.01
27	17.79±5.53	186.39±3.21	689.82±1.94	166.35±1.57	34.09±1.13	1094.44±4.09
28	9.88±0.14	190.90±0.38	766.24±0.00	167.00±0.06	54.80±1.02	1188.83±0.84
29	15.37±0.20	258.21±0.08	953.89±1.26	218.43±0.43	53.11±0.14	1499.10±0.41
30	19.10±0.06	255.60±2.32	1007.85±0.86	219.22±1.08	54.50±0.34	1556.26±3.97

2.4 聚类分析

采用 SPSS 20.0 软件对 30 个不同产地的小麦麸皮样品进行系统 CA, 结果见图 4。当欧氏距离为 12.5 时, 所有小麦麸皮样品可分为 3 大类, 其中 5 号为第 1 类, 活性成分含量最优; 1 号、2 号、3 号、12 号、17 号、26 号为第 2 类, 活性成分含量次之; 4 号、6 号、7 号、8 号、9 号、10 号、11 号、13 号、14 号、15 号、16 号、18 号、19 号、20 号、21 号、22 号、23 号、24 号、25 号、27 号、28 号、29 号、30 号为第 3 类, 活性成分含量较低。

结合样品采集地的地理位置分析, 新疆奇台县位于天山东北部, 新疆柯坪县位于天山西南部, 由此可知活性成分含量较高, 品质较好的小麦麸皮多产于靠近天山山脉的地区。因此, 在一定程度上, 可推断不同产地的气候、土壤等条件对小麦麸皮中活性成分的含量可造成影响。

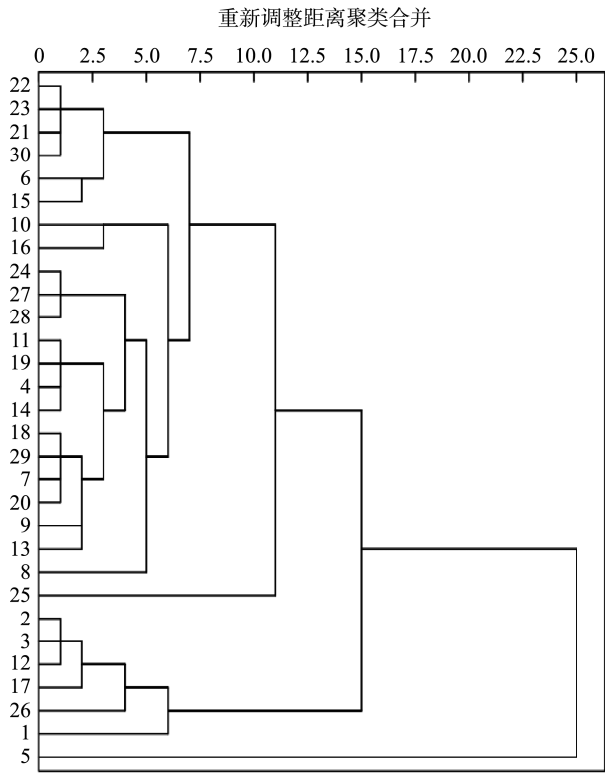


图 4 不同产地小麦麸皮样品聚类分析
Fig.4 Cluster analysis of wheat bran samples from different places

3 讨论与结论

在前期研究中多数是对小麦或小麦麸皮中营养成分的测定和功能开发的探索^[39-40], 按照产区分类的小麦麸皮中活性成分的相关研究还未涉及。本研究基于前期研究基础, 对全国 7 个省份不同地区的 30 个小麦麸皮样品中主要化学物质的含量进行测定, 并对其进行 CA。根据 CA, 当欧氏距离为 12.5 时, 30 个小麦麸皮样品可被分为 3 类, 其

中 5 号(新疆奇台县)为第 1 类, 该样品中的活性成分含量较为优异; 1 号、2 号、3 号、12 号、17 号、26 号为第 2 类, 活性成分含量次之; 其余样品被聚为第 3 类, 活性成分含量较低。

本研究表明, 小麦麸皮中含有丰富的活性成分, 不同产地小麦麸皮中活性成分的含量受到区域性的土壤、营养等诸多生态因子的影响, 存在一定差异, 但由于未对不同产地温度、光照、水分、土壤等环境条件和活性成分含量之间进行数据的相关性统计分析, 后期需要加强该方面的研究。

综上所述, 5 号样品(新疆奇台县)的小麦麸皮中甜菜碱、多酚和 ARs 含量较高, 可进一步开发相关功能性食品。也可对该产地的土壤、光照、温度、湿度等进行分析后, 得出有利于高活性成分含量小麦麸皮的生长因素, 为以后小麦的种植和小麦麸皮的高效利用提供理论支持。

参考文献

[1] PIETÄINEN S, MOLDIN A, STRÖM AK, *et al.* Effect of physicochemical properties, pre-processing, and extraction on the functionality of wheat bran arabinoxylans in breadmaking-A review [J]. Food Chem, 2022, 383: 132–584.

[2] LI M, TANG H, HU H, *et al.* Production of acetic acid from wheat bran by catalysis of an acetoxylan esterase [J]. Bioresour Technol, 2024, 396(1): 30–44.

[3] NEVES MA, KIMURA T, SHIMIZU N, *et al.* Production of alcohol by simultaneous saccharification and fermentation of low-grade wheat flour [J]. Braz Arch Biol Technol, 2006, 49(3): 481–490.

[4] MIRSEYED SP, KHEIRABADI S, ANBARTEH R, *et al.* Assessment of mycotoxin sequestration efficacy in *Saccharomyces cerevisiae* by-products cultured in wheat bran and whey protein medium [J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 3101–3101.

[5] 王涛, 李丹妮, 王文鹏, 等. 小麦麸皮微波处理对全麦粉面筋品质和流变学特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(2): 816–821.

WANG T, LI DN, WANG WP, *et al.* Effect of microwave treatment of wheat bran on gluten quality and rheological properties of whole wheat flour [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(2): 816–821.

[6] 张瑞雪, 李沿, 任晨刚, 等. 小麦麸皮在饲料及食品加工领域应用研究现状[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(6): 1–5.

ZHANG RX, LI Y, REN CG, *et al.* Research status of wheat bran application in feed and food processing [J]. Grain Food Ind, 2023, 30(6): 1–5.

[7] 梁婷婷, 王倩, 邹霞霜, 等. 麦麸有效成分及提取工艺研究进展[J]. 特产研究, 2024, 2(7): 1–8.

LIANG TT, WANG Q, ZOU JS, *et al.* Research progress on active ingredients and extraction process of wheat bran [J]. Spec Res, 2024, 2(7): 1–8.

[8] ALBERTSON AM, REICKS M, JOSHI N, *et al.* Whole grain consumption trends and associations with body weight measures in the United States: Results from the cross sectional national health and nutrition examination survey 2001–2012 [J]. Nutr J, 2016, 15: 8.

[9] HOEVENAARS FPM, ESSER D, SCHUTTE S, *et al.* Whole grain wheat

- consumption affects postprandial inflammatory response in a randomized controlled trial in overweight and obese adults with mild hypercholesterolemia in the graandios study [J]. *J Nutr*, 2019, 149: 2133–44.
- [10] SCHUTTEE S, ESSER D, HOEVENAARS FPM, *et al*. A 12-wk whole-grain wheat intervention protects against hepatic fat: The Graandios study, a randomized trial in overweight subjects [J]. *Am J Clin Nutr*, 2018, 108: 1264–1274.
- [11] CECILIE K, IZABELA B, CARL B, *et al*. Alkylresorcinols (biomarkers of whole grain intake), cereal fibre intake and metabolic profile-results from a European study [J]. *P Nutr Soc*, 2020, 79(2), 1.
- [12] 安冬, 杨军红, 宋晓萌. 甜菜碱改善肥胖及相关代谢紊乱作用机制的研究进展[J]. *中南药学*, 2021, 19(7): 1393–1398.
- DONG A, YANG JH, SONG SM. Research progress on the mechanism of betaine in improving obesity and related metabolic disorders [J]. *Zhongnan Pharm*, 2021, 19(7): 1393–1398.
- [13] 虞啸炫, 欧元祝, 唐立萍, 等. 甜菜碱在提高血清乳酸脱氢酶活性稳定性中的作用[J]. *检验医学*, 2021, (6): 623–626.
- YU XX, OU YZ, TANG LP, *et al*. Role of betaine in improving the stability of serum lactate dehydrogenase activity [J]. *Lab Med*, 2021, (6): 623–626.
- [14] 严欢, 韩加, 邵家丽, 等. 新疆各产地小麦麸皮营养成分分析[C]. 中国营养学会, 中国疾病预防控制中心营养与健康所, 农业农村部食物与营养发展研究所, 中国科学院上海营养与健康研究所, 华中科技大学公共卫生学院. 中国营养学会第十五届全国营养科学大会论文汇编. 新疆医科大学公共卫生学院; 新疆维吾尔自治区分析测试研究院, 2022.
- YAN H, HAN J, SHAO JL, *et al*. Analysis of nutritional composition of wheat bran in different producing areas of Xinjiang [C]. Chinese Nutrition Society, Institute of Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, School of Public Health, Huazhong University of Science and Technology. Proceedings of the 15th National Conference on Nutrition Science of the Chinese Nutrition Society. School of Public Health, Xinjiang Medical University; Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Analysis and Testing, 2022.
- [15] CHEN Y, XIA T, LIU H, *et al*. Preparation of betaine injection and its therapeutic effect in pulmonary arterial hypertension [J]. *Basic Clin Pharmacol*, 2023, 134(2): 219–230.
- [16] 樊凤娇, 黄沁沁, 李彭, 等. 谷物源烷基间苯二酚的分析技术研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(1): 250–257.
- FAN FJ, HUANG QQ, LI P, *et al*. Research progress on analytical techniques of alkyl resorcinol from cereals [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2022, 38(1): 250–257.
- [17] 曾子聪. 挤压加工对糙米多酚及其抗氧化性影响的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- ZENG ZC. Study on the effect of extrusion processing on polyphenols and their antioxidant properties in brown rice [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [18] PAESANI C, LAMMERS CT, SCIARINI SL, *et al*. Effect of chemical, thermal, and enzymatic processing of wheat bran on the solubilization, technological and biological properties of non-starch polysaccharides [J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 328: 121747.
- [19] YONY R, THAISA CM, TERESA GDC, *et al*. Specific dietary fibers prevent heavy metal disruption of the human gut microbiota *in vitro* [J]. *FRI*, 2024, 176: 113858.
- [20] 兰晓光, 马倩. 小麦麸皮综合利用技术[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(34): 118–121.
- LAN XG, MA Q. Comprehensive utilization technology of wheat bran [J]. *Agric Eng Technol*, 2023, 43(34): 118–121.
- [21] 王雨晴, 辛嘉英, 徐阳. 好食脉孢菌发酵小麦麸皮回添对面团品质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(8): 31–36.
- WANG YQ, XIN JY, XU Y. Effect of wheat bran readdition fermented by *Rhizospora* spp. on dough quality [J]. *Cere Oils*, 2023, 36(8): 31–36.
- [22] ZHONG RH, LONG JA, WANG F, *et al*. Association between serum choline and betaine concentrations and longitudinal changes of body composition in community-dwelling middle-aged and older Chinese adults [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2020, 45(7): 737–744.
- [23] SANZ-FERNANDEZ MV, TORRES-ROVIRA L, PESANTEZ-PACHECO JL, *et al*. A cross-sectional study of obesity effects on the metabolomic profile of a leptin-resistant swine model [J]. *Metabolites*, 2020, 10(3): 89.
- [24] GAO X, RANDELL E, ZHOU H, *et al*. Higher serum choline and betaine levels are associated with better body composition in male but not female population [J]. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0193114.
- [25] KANG S, CHEN W, LIU X, *et al*. Hyperuricemia and the risk of heart failure: Pathophysiology and therapeutic implications [J]. *Front Endocrinol*, 2021, 12: 770815.
- [26] LORENZO DSJ, QUADROS AS, WESCHENFELDER C, *et al*. Oxidative stress biomarkers, nut-related antioxidants, and cardiovascular disease [J]. *Nutrients*, 2020, 12(3): 682.
- [27] 尹佳萌, 王敏, 肖艳霞, 等. 多酚对衰老相关心血管疾病的保护作用[J]. *中华老年多器官疾病杂志*, 2022, 21(10): 788–792.
- YIN JM, WANG M, XIAO YX, *et al*. Protective effect of polyphenols on aging-related cardiovascular diseases [J]. *Chin J Geriatr Multi-Organ Dis*, 2022, 21(10): 788–792.
- [28] 杜丰霞, 尹泽黎. 多酚类化合物与高血压的相关研究[J]. *国际心血管病杂志*, 2023, 50(3): 134–136, 174.
- DU FX, YIN ZL. Correlation between polyphenolic compounds and hypertension [J]. *Int J Cardiovasc Dis*, 2023, 50(3): 134–136, 174.
- [29] 范湾, 王健, 白金山, 等. 膳食烷基间苯二酚在癌症预防中的研究进展[J]. *中国癌症防治杂志*, 2023, 15(3): 349–353.
- FAN W, WANG J, BAI JS, *et al*. Research progress of dietary alkylresorcinol in cancer prevention [J]. *Chin J Cancer Prev Control*, 2023, 15(3): 349–353.
- [30] HOUSSEM B, MACIEJ S. Computational assessment of the primary and secondary antioxidant potential of alkylresorcinols in physiological media [J]. *RSC Adv*, 2023, 13(42): 29463–29476.
- [31] 杨新童, 李亨, 李书国. 麦源烷基间苯二酚的提取及其功能特性研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(2): 6–9, 24.
- YANG XT, LI T, LI SG. Research progress on the extraction and functional characteristics of alkyl resorcinol from mai source [J]. *Cere Oils*, 2022, 35(2): 6–9, 24.
- [32] 朱天仪, 周洁. 全麦粉中烷基间苯二酚提取方法优化的研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(1): 18–20.

- ZHU TY, ZHOU J. Study on optimization of extraction method of alkylresorcinol from whole wheat flour [J]. *Cere Oils*, 2022, 35(1): 18–20.
- [33] ZHANG YT, SHI L, HAN CL, *et al*. The active components in whole grain wheat for colon cancer prevention: Synergistic effects between phytochemical alkylresorcinols and fiber microbial metabolite butyrate [J]. *Curr Dev Nutr*, 2020, 4(S2): 498–498.
- [34] LIN XX, ZHANG XX, ZHANG R, *et al*. Gut modulation based anti-diabetic effects of carboxymethylated wheat bran dietary fiber in high-fat diet/streptozotocin-induced diabetic mice and their potential mechanisms [J]. *Food Chem Toxicol*, 2021, 152, 112235.
- [35] ROSARIO M, ELISA M, YVELISE F, *et al*. A new breakfast brioche containing bergamot fiber prevents insulin and glucose increase in healthy volunteers: A pilot study [J]. *Minerva Endocrinol*, 2021, 46(2): 214–225.
- [36] 严欢, 张倩, 杨中, 等. 小麦麸皮提取物活性及其与减肥降脂相关研究进展[J]. *医学动物防制*, 2023, 39(7): 693–697.
- YAN H, ZHANG Q, YANG Z, *et al*. Research progress on the activity of wheat bran extract and its relationship with weight loss and lipid reduction [J]. *Med Anim Control*, 2023, 39(7): 693–697.
- [37] 全文彬, 王娟, 黄继红, 等. 小麦麸皮可溶性膳食纤维的理化性质和结构表征[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–10. [2024-02-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037996>
- QUAN WB, WANG J, HUANG JH, *et al*. Physicochemical properties and structural characterization of soluble dietary fiber from wheat bran [J/OL]. *Food Ferment Ind*, 1–10. [2024-02-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037996>
- [38] 严欢. 小麦麸皮多酚和小麦麸皮油对饮食诱导肥胖大鼠减肥降脂作用及机制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2023.
- YAN H. Effect and mechanism of wheat bran polyphenols and wheat bran oil on diet-induced weight loss and lipid reduction in obese rats [D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2023.
- [39] 张杰. 发酵麸皮膳食纤维对模型大鼠脂质代谢影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- ZHANG J. Effect of fermented bran dietary fiber on lipid metabolism in model rats [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [40] 黄清清. 麦麸中烷基间苯二酚的富集、纯化及其淀粉复合物体外消化特性的研究[D]. 南京: 江苏大学, 2022.
- HUANG QQ. Enrichment and purification of alkyl resorcinol in wheat bran and study on the in vitro digestion characteristics of starch complexes [D]. Nanjing: Nanjing University, 2022.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)

作者简介



严欢, 博士, 研究员, 主要研究方向为天然产物活性和营养与食品卫生学研究。
E-mail: 19835500@qq.com



杨中, 研究员, 主要研究方向为食品安全检测技术研究。
E-mail: 893380184@qq.com