

处理方式对黑青稞酚类物质含量及体外抗氧化活性的影响

张 杰^{1,2,3} 郑万财^{1,2,3} 党 斌^{1,2,3} 杨希娟^{1,2,3} 郭俊玲⁴

(1. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016; 2. 青海省青藏高原农产品加工重点实验室,青海 西宁 810016; 3. 青藏高原种质资源研究与利用实验室,青海 西宁 810016; 4. 长沙晶易医药科技股份有限公司,湖南 长沙 410221)

摘要:[目的]提高黑青稞多酚利用率及抗氧化活性。**[方法]**以黑青稞为原料,采用超声波(UT)、微波(MT)、紫外(UVT)3种方式处理黑青稞,对比黑青稞的基本营养成分、酚类物质含量、组成及抗氧化活性差异。**[结果]**与未处理相比,经3种方式处理后黑青稞的脂肪含量显著增加($P<0.05$),而纤维含量显著降低($P<0.05$)。3种方式处理的黑青稞总酚及总黄酮含量均显著提高($P<0.05$),分别为未处理组的1.03~1.19倍和1.24~1.46倍,其中UT处理可显著提高青稞多酚含量,总酚和总黄酮含量分别提高了18.72%和46.22%。UVT处理黑青稞主要增加的酚类物质组分为羟基肉桂酸类及黄酮醇类,UT处理主要增加的酚类物质组分为黄酮类及黄烷醇类,MT处理主要增加的酚类物质组分为羟基苯甲酸类。3种处理黑青稞的抗氧化活性指数(APC)由强到弱依次为UT(99.94%)>UVT(93.35%)>MT(82.91%)>CK(74.10%),且酚类化合物与抗氧化活性之间存在较强的相关性。**[结论]**UT处理黑青稞的酚类物质含量及抗氧化活性最高。

关键词:黑青稞;处理方式;酚类物质;营养成分;抗氧化活性

Effects of different treatments on phenolic content and *in vitro* antioxidant activity in black highland barley

ZHANG Jie^{1,2,3} ZHENG Wancai^{1,2,3} DANG Bin^{1,2,3} YANG Xijuan^{1,2,3} GUO Junling⁴

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Qinghai Tibetan Plateau Agricultural Processing Key Laboratory, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining, Qinghai 810016, China; 4. Changsha King-eagle Med Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410221, China)

Abstract: [Objective] To improve the polyphenol utilization and antioxidant activity of black highland barley. [Methods] Black highland barley was treated using ultrasonic treatment (UT), microwave treatment (MT), and ultraviolet irradiation treatment (UVT). The differences in basic nutritional components, phenolic content, phenolic composition, and antioxidant activity were comparatively analyzed. [Results] Compared with the untreated group, the fat content of black highland barley significantly increased ($P<0.05$) after all three treatments, while the fiber content significantly decreased ($P<0.05$). The total phenolic and total flavonoid content were significantly increased ($P<0.05$) by all three treatments, reaching 1.03~1.19 times and 1.24~1.46 times those of the untreated group, respectively. Among them, UT significantly enhanced polyphenol content in black highland barley, increasing total phenolics and total flavonoids by 18.72% and 46.22%, respectively. UVT mainly increased hydroxycinnamic acids and flavonols, UT primarily increased flavonoids and flavanols, while MT

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2022YFD2301300)

通信作者:党斌(1980—),男,青海大学副研究员,博士。E-mail:156044168@qq.com

收稿日期:2025-01-16 **改回日期:**2025-07-27

引用格式:张杰,郑万财,党斌,等.处理方式对黑青稞酚类物质含量及体外抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2025,41(11):109-117.

Citation:ZHANG Jie, ZHENG Wancai, DANG Bin, et al. Effects of different treatments on phenolic content and *in vitro* antioxidant activity in black highland barley[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 109-117.

mainly increased hydroxybenzoic acids. The antioxidant potency composite index (APC) of black highland barley treated by the three methods ranked as follows: UT (99.94%)>UVT (93.35%)>MT (82.91%)>CK (74.10%). There was a strong correlation between phenolic compounds and antioxidant activity. [Conclusion] UT resulted in the highest phenolic content and antioxidant activity in black highland barley.

Keywords: black highland barley; different treatments; phenolic; nutritional components; antioxidant activity

青稞(*Hordeum vulgare L. var. nudum* Hook. f.)也称裸大麦,是青藏高原地区的一种特色粮食作物,具有三高两低的营养特点^[1]。黑青稞是一类珍贵的种质资源^[2-4],含有丰富的膳食纤维、 β -葡聚糖、抗性淀粉和酚类物质^[5-6],其中酚类物质因具有良好的抗炎活性、抗氧化活性、抑菌活性及抗癌活性而被广泛关注^[7]。但谷物中的酚类物质大多以结合态形式存在,且主要与细胞壁的结构成分(木质素、纤维素、果胶、半纤维素和蛋白质)共价结合^[8-9],生物利用度较低,在实际加工及应用中难以发挥其价值^[10]。

目前,已有大量学者通过萌发技术加速谷物体内的各类生化代谢反应进程,降解蛋白质和淀粉为氨基酸、葡萄糖等小分子物质^[11],同时可提高谷物中多酚物质含量^[12]。此外,大量学者^[13-15]采用微生物发酵法富集谷物多酚,但由于谷物经萌发和发酵处理后其色泽、组织状态、风味发生改变,在后续相关产品的加工应用上存在局限性。针对以上问题部分学者^[16]通过借助微波、超高压、超声波、低温等离子体及紫外照射等方式处理谷物,一方面使得谷物因对抗外部恶劣环境建立自身防御机制,并通过基因调控、相关酶的表达等应激反应,继而达到富集酚类物质的目的;另一方面利用不同处理的空化效应、机械效应及生物效应等,通过改变谷物的细胞结构,利于多酚物质的释放。目前,常见的处理方式有超声处理、紫外处理、微波处理、温度处理、等离子体处理和金属处理等,其中超声波处理、紫外处理及微波处理因其设备简单易得、试验过程易操作、处理温度低、酚类物质富集显著等优势被广泛应用。贾丽婷^[17]研究发现,经微波处理后黑米的结合酚含量显著增加,增幅高达 16.4%,且 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力也显著提升了 17.60% 和 26.00%。陈旭等^[18]研究发现,经 310 nm 的紫外灯照射处理后,发芽大豆中异黄酮积累,且大豆异黄酮含量与丙氨酸解氨酶(PAL)活力呈良好的线性关系。Hasan 等^[19]研究表明,超声波处理能够诱导植物中酚类物质的生物合成。陈培栋^[20]研究发现,微波处理后糙米的总酚及总黄酮物质均超过未处理糙米的 50%,抗氧化活性和还原力均保持较高水平。此外,Ji 等^[21]研究表明,超声波、磁场、电场、高压和光照等物理因素能促进黄酮合成。但目前有关研究大多集中在单一处理下苦荞、黑米等多酚富集的工艺条件优化,而针对超声波、微波和紫外处理富集青稞多酚的研究较少,且不同处理方式对黑青稞酚类物质

含量、组分及生物活性的差异尚不清晰。试验拟从黑青稞原料入手,比较超声波、微波及紫外处理富集黑青稞酚类物质的含量、组成及抗氧化活性差异,为提升黑青稞附加值筛选出高效的处理方式,同时也为黑青稞的功能性产品研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

青稞:昆仑 20 号,青海省农林科学院作物育种栽培研究所麦类研究室;

福林酚:优级纯,北京索莱宝科技有限公司;

没食子酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、藜芦酸、苯甲酸、水杨酸、山麦芽酚、紫杉叶素、芦丁、香叶木苷、杨梅素、槲皮素、木犀草素、香叶木素、儿茶素、表儿茶素、异牡荆黄素、原花青素 B₂标准品:上海源叶生物科技有限公司;

2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)、无水醋酸钠、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)铵盐(ABTS)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):天津市富宇精细化工有限公司;

TOTAL STARCH 试剂盒:爱尔兰 Megazyme 公司。

1.2 仪器与设备

高速万能粉碎机:FW-100 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

恒温数控超声波清洗器:KQ-500GDV 型,昆山市超声仪器有限公司;

高速台式冷冻离心机:TGL-20M 型,湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司;

旋转蒸发仪:Retavapor R-215 型,瑞士布奇有限公司;

微波炉:G80F20 型,广东格兰仕微波炉电器制造有限公司;

紫外可见分光光度计:N4S 型,上海仪电分析仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞样品制备

(1) 微波(MT)处理:称取颗粒饱满的青稞籽粒 20 g 于玻璃培养皿中,置于微波炉炉腔内进行微波胁迫处理,处理条件为功率 240 W,时间 20 s,处理结束后粉碎、过 80 目筛备用。

(2) 超声波(UT)处理:称取颗粒饱满的青稞籽粒

20 g于自封袋中,在35 °C、500 W下处理30 min,随后取出粉碎、过80目筛备用。

(3) 紫外(UVT)处理:称取颗粒饱满的青稞籽粒20 g,将其置于紫外灯下(样品距紫外光源0.5 m)处理60 min,随后粉碎、过80目筛备用。

(4) 未处理(CK):挑选颗粒饱满的青稞籽粒,经粉碎、过80目筛备用。

1.3.2 基本营养成分测定

(1) 总淀粉含量:采用TOTAL STARCH试剂盒测定。

(2) 脂肪含量:参照GB 5009.6—2016。

(3) 蛋白质含量:参照GB 5009.5—2016。

(4) 粗纤维含量:参照GB 5009.10—2003。

(5) 灰分含量:参照GB 5009.4—2016。

(6) 水分含量:参照GB 5009.3—2016。

基本营养成分含量均以干基计。

1.3.3 多酚和黄酮含量测定

(1) 游离酚提取:参照Jin等^[22]的方法。称取1 g黑青稞样品于烧杯中,加入25 mL 80%的丙酮溶液,超声处理20 min,3 000 r/min离心15 min后收集上清液,经旋转蒸干后定容至10 mL,-20 °C避光保存。

(2) 结合酚提取:参照Jin等^[22]的方法。收集提取游离酚后的残渣,加入20 mL正己烷,3 000 r/min离心5 min后弃去上清液,残渣中加入17 mL 11%盐酸—甲醇溶液,70 °C水浴1 h,采用乙酸乙酯进行萃取,萃取相旋转蒸干,定容至10 mL,-20 °C避光保存。

(3) 多酚含量测定:采用Folin-Ciocalteu法^[23]。以100 g样品中(干重)没食子酸当量计,没食子酸标准曲线为 $Y=0.0042X+0.0124$ (0~300 μg/mL, $R^2=0.9996$)。

(4) 黄酮含量测定:采用NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH比色法。以100 g样品中(干重)芦丁当量计,芦丁标准曲线为 $Y=0.0055X-0.0047$ (0~80 μg/mL, $R^2=0.9947$)。

1.3.4 酚类物质组成分析 参照文献[7]。

1.3.5 体外抗氧化活性测定 参照文献[23]。

(1) FRAP还原力:吸取1 mL多酚提取液,加入4.5 mL FRAP工作液,振荡混匀,避光反应30 min,测定593 nm处吸光度,以100 g样品中(干重)水溶性维生素E当量表示,根据标准曲线 $Y=0.0072X-0.0012$ (0~300 μmol/L, $R^2=0.9992$)进行计算。

(2) DPPH·清除力:吸取1 mL多酚提取液,加入4 mL 0.1 mmol/L的DPPH甲醇溶液,振荡混匀,避光反应30 min,测定517 nm处吸光度。以100 g样品中(干重)水溶性维生素E当量表示,根据标准曲线 $Y=0.0042X+0.9163$ (0~140 μmol/L, $R^2=0.9928$)进行计算。

(3) ABTS⁺·清除力:吸取200 μL多酚提取液,加入4 mL ABTS⁺·工作液,振荡混匀,避光反应30 min,测定

734 nm处吸光度,以100 g样品中(干重)水溶性维生素E当量表示,根据标准曲线 $Y=-0.001X+0.6242$ (0~300 μmol/L, $R^2=0.9907$)进行计算。

1.3.6 抗氧化活性综合指数分析 使用抗氧化活性综合指数(APC指数法)^[24]对不同处理方式黑青稞中抗氧化活性进行分析。分别按式(1)、式(2)计算APC指数和APC综合指数。

$$A = \frac{D}{D_{\max}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$B = \sum \frac{D}{D_{\max}} \times n \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

A——APC指数,%;

B——APC综合指数,%;

n——使用的方法总数;

D——每种方法的测定值,μmol/100 g;

D_{\max} ——每种方法测定值的最大值,μmol/100 g。

1.4 数据处理

采用SPSS 26.0软件进行数据统计分析,结果以平均值±标准差表示,显著性差异采用LSD多重比较法, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 对黑青稞基本营养成分的影响

由表1可知,3种处理方式的黑青稞纤维含量为3.92%~4.16%,与CK组相比显著降低($P<0.05$)。3种处理方式的总淀粉、蛋白质及灰分含量分别为61.42%~61.93%,10.03%~10.48%和1.73%~2.07%,与CK组相比均无显著差异,而MT和UT处理的水分含量显著降低($P<0.05$),这可能是由于MT和UT的热效应,加快了物料的水分散失。3种处理方式的脂肪含量均显著增加,其中MT处理后脂肪含量最高达到1.70%,与申瑞玲等^[25]的研究结果一致,这可能是经MT处理后黑青稞中部分复合脂肪游离出来或者淀粉脂复合物解体引起脂肪含量升高^[26]。此外,3种处理方式的粗纤维含量均显著降低($P<0.05$),可能是经3种处理后黑青稞细胞壁复合结构被破坏,其纤维素、半纤维素被降解所致^[17]。

2.2 对黑青稞酚类物质含量的影响

由图1可知,不同处理方式对黑青稞籽粒的游离酚、结合酚和总酚含量均存在差异。与CK组相比,3种处理组的游离酚及总酚均显著升高,其中UT处理及UVT处理的总酚含量分别提高了18.72%和13.85%,可能是由于UT处理可以引发空化及化学效应,造成黑青稞的细胞结构被破坏,促进细胞内容物释放,使得游离酚、结合酚及总酚含量升高^[27]。而UVT处理通过影响酚类物质合成途径中相关基因及酶的表达,使得酚类物质含量升高^[28]。

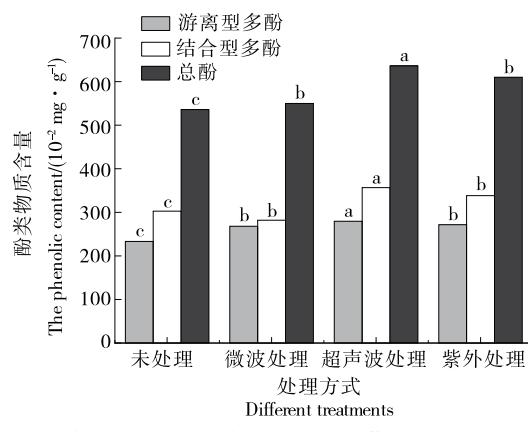
表 1 处理方式对黑青稞基本营养成分的影响[†]

Table 1 Effect of different treatments on the nutritional composition of black highland barley %

组别	总淀粉	脂肪	水分	灰分	蛋白质	粗纤维
CK	61.85±1.18	1.18±0.08 ^b	10.72±0.04 ^a	1.88±0.04 ^{ab}	10.43±0.29	4.60±0.05 ^a
MT 处理	61.49±0.51	1.70±0.02 ^a	9.19±0.16 ^b	1.73±0.07 ^b	10.17±0.06	3.92±0.10 ^b
UT 处理	61.93±0.63	1.67±0.02 ^a	9.35±0.09 ^b	1.88±0.11 ^{ab}	10.48±0.07	3.99±0.00 ^b
UVT 处理	61.42±0.47	1.64±0.02 ^a	10.62±0.33 ^a	2.07±0.08 ^a	10.03±0.21	4.16±0.15 ^b

† 同列字母不同表示不同处理方式差异显著($P<0.05$)。

此外,与 CK 相比,MT 处理的结合酚含量降低,而总酚及游离酚含量增加显著,分别提高了 2.64% 和 14.94%,这主要是由于 MT 处理后结合酚通过非酶过程释放,从而造成总酚含量增加及结合酚含量降低^[29]。



字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 1 处理方式对黑青稞酚类物质含量的影响

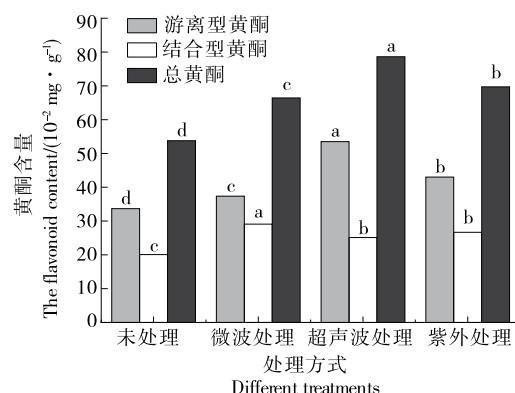
Figure 1 Effect of different treatments on phenolic content of black highland barley

2.3 对黑青稞黄酮含量的影响

由图 2 可知,不同处理方式对黑青稞籽粒的游离黄酮、结合黄酮和总黄酮含量均存在差异。与未处理组相比,3 种处理组的游离黄酮、结合黄酮和总黄酮含量均显著高于未处理组,这主要是由于超声波处理的机械及空化效应^[27]、微波处理的热效应^[30]破坏了青稞细胞膜结构,使黄酮类物质的溶出率增加,而紫外处理通过调节酶的活性和与生长代谢相关基因的表达,促进多酚的积累^[31]。此外,超声波、磁场等逆境胁迫可诱导谷物种子中 *PAL*、*CHI* 和 *FLS* 基因的表达^[28],使黄酮含量增加,与试验结果一致。超声波处理的黑青稞中游离黄酮和总黄酮含量均为最高,与未处理相比分别提高了 58.85% 和 46.22%,说明超声波可作为黑青稞提高其黄酮物质的处理方式。

2.4 对黑青稞酚类物质组成的影响

采用 UHPLC-MS/MS 分别测定了黑青稞处理前后的酚类物质组成及含量的变化,结果见表 2。由表 2 可知,



字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 2 处理方式对黑青稞黄酮含量的影响

Figure 2 Effect of different treatments on the flavonoid content of black highland barley

CK 组共检出 24 种游离型酚类物质、24 种结合型酚类物质;经 MT 处理后共检出 25 种游离型酚类物质、22 种结合型酚类物质;经 UT 处理后共检出 24 种游离型酚类物质、20 种结合型酚类物质;经 UVT 处理后共检出 24 种游离型酚类物质、22 种结合型酚类物质。3 种处理方式均减少了结合型酚类物质的种类,但显著提高了酚类物质总量及游离型酚类物质含量。此外,不同处理方式黑青稞的不同形态酚类物质含量与图 1、图 2 的结果存在差异,主要是由于酚类物质组成测定采用多个标准品进行 UHPLC-MS/MS 分析。而图 1、图 2 中不同形态酚类物质含量分别仅以没食子酸、芦丁作为标准品,且采用分光光度法进行含量测定,因标准品及测定方法的差异造成的结果不同。与 CK 组相比,3 种处理的羟基肉桂酸(游离型)、羟基苯甲酸(游离型和结合型)、黄酮醇(游离型和结合型)、黄烷醇(游离型)含量均显著提高($P<0.05$),而黄烷酮(游离型和结合型)含量均显著降低($P<0.05$)。

UVT 处理的总酚酸及总酚含量最高,分别为 (464.07 ± 3.10) , $(818.55 \pm 4.57) \text{ mg}/100 \text{ g}$,与 CK 组相比分别提高了 59.80%,34.78%。酚类物质组分中 UVT 处理的羟基肉桂酸和黄酮醇总量最高,分别为 CK 组的 1.34 倍和 1.89 倍,其中阿魏酸(游离型)、阿魏酸(结合型)、咖啡

表2 处理方式对黑青稞酚类物质组成的影响[†]

Table 2 Effect of different treatments on the composition and content of phenols in black highland barley mg/100 g

种类	名称	CK		MT 处理		UT 处理		UVT 处理	
		游离型	结合型	游离型	结合型	游离型	结合型	游离型	结合型
羟基肉 阿魏酸		20.46±0.34 ^d	179.21±3.98 ^b	28.42±0.53 ^c	111.46±3.70 ^c	44.58±1.69 ^a	179.89±5.78 ^b	39.70±0.86 ^b	232.20±2.79 ^a
桂酸 对香豆酸		5.76±0.39 ^a	8.55±0.22 ^a	6.03±2.38 ^a	4.84±1.02 ^b	7.45±0.96 ^a	1.19±0.00 ^c	4.99±0.27 ^a	8.63±0.79 ^a
咖啡酸		3.96±0.06 ^b	26.62±0.85 ^a	3.99±0.56 ^b	4.50±0.77 ^c	3.60±0.05 ^b	4.82±0.65 ^c	4.69±0.36 ^a	7.70±0.63 ^b
邻香豆酸		nd	1.72±0.09 ^b	1.27±0.33 ^a	4.69±0.15 ^a	0.76±0.02 ^{ab}	4.84±0.02 ^a	0.44±0.03 ^b	2.76±0.81 ^b
小计		30.17±0.70 ^d	216.11±6.06 ^b	39.71±1.69 ^c	125.50±3.62 ^d	56.40±2.47 ^a	190.74±7.10 ^c	49.82±0.73 ^b	281.29±3.52 ^a
羟基苯 没食子酸		1.13±0.08 ^b	2.01±0.16 ^a	0.51±0.08 ^d	2.28±0.55 ^a	0.62±0.34 ^c	1.84±1.03 ^a	1.59±0.28 ^a	2.92±0.18 ^a
甲酸 原儿茶酸		2.40±0.06 ^d	5.52±0.09 ^b	9.47±0.80 ^b	7.08±0.25 ^a	4.75±0.56 ^c	3.38±0.20 ^d	11.49±0.48 ^a	4.73±0.65 ^c
苯甲酸		7.84±1.68 ^d	2.14±0.15 ^c	65.48±3.79 ^a	19.41±1.93 ^a	41.62±0.77 ^b	9.89±2.05 ^{bc}	31.72±1.32 ^c	12.13±0.20 ^{ab}
香草酸		12.51±0.41 ^d	4.65±0.45 ^b	23.37±0.97 ^b	3.73±0.30 ^b	21.38±0.91 ^c	3.95±0.00 ^b	26.90±0.71 ^a	7.95±0.66 ^a
丁香酸		1.68±0.12 ^d	1.95±0.48 ^b	4.94±0.26 ^b	2.52±0.10 ^{ab}	2.96±0.41 ^c	1.19±0.36 ^c	6.29±0.11 ^a	2.99±0.51 ^a
对羟基苯甲酸		2.87±0.14 ^b	1.29±0.55 ^a	6.54±1.84 ^a	1.07±0.06 ^a	6.45±0.17 ^a	0.21±0.08 ^b	1.30±0.47 ^b	0.44±0.02 ^b
水杨酸		0.69±0.08 ^b	0.74±0.19 ^c	4.06±0.76 ^a	6.68±0.45 ^b	3.19±0.99 ^a	1.32±0.12 ^c	3.41±0.07 ^a	12.45±0.84 ^a
藜芦酸		0.49±0.21 ^b	0.21±0.08 ^d	1.78±0.18 ^a	2.29±0.47 ^b	0.60±0.19 ^b	1.32±0.08 ^c	1.38±0.40 ^a	5.27±0.57 ^a
小计		29.61±2.17 ^c	18.51±0.96 ^b	116.15±7.00 ^a	45.06±5.36 ^a	81.58±1.05 ^b	23.10±8.65 ^b	84.08±1.26 ^b	48.89±0.45 ^a
黄酮 木犀草素		5.70±0.00 ^d	0.04±0.00 ^a	10.41±0.85 ^c	3.25±0.27 ^a	16.17±1.07 ^a	3.13±0.91 ^a	13.23±1.23 ^b	2.76±0.34 ^a
异牡荆黄素		4.12±0.06 ^c	0.10±0.01 ^a	4.44±0.28 ^c	0.45±0.09 ^a	9.98±0.34 ^a	0.49±0.09 ^a	5.68±0.28 ^b	0.27±0.08 ^a
小计		9.82±0.06 ^d	0.14±0.01 ^b	14.85±0.78 ^c	3.74±0.55 ^a	26.15±1.27 ^a	3.62±0.97 ^a	18.91±1.47 ^b	3.04±0.38 ^a
黄酮醇 杨梅素		0.12±0.01 ^b	0.21±0.04 ^c	1.05±0.08 ^a	0.38±0.09 ^b	nd	1.12±0.11 ^a	nd	0.39±0.05 ^b
槲皮素		0.25±0.05 ^b	0.69±0.05 ^c	1.63±0.55 ^a	1.34±0.03 ^b	1.65±0.27 ^a	2.79±0.24 ^a	0.75±0.09 ^b	0.61±0.05 ^c
山奈酚		0.36±0.05 ^a	0.87±0.04 ^c	0.97±0.09 ^a	1.68±0.02 ^c	0.27±0.00 ^a	2.70±0.51 ^b	0.57±0.08 ^a	4.79±0.51 ^a
芦丁		0.51±0.03 ^a	0.57±0.02 ^a	0.39±0.05 ^b	nd	nd	nd	0.40±0.05 ^b	nd
紫杉叶素		0.29±0.01 ^d	0.58±0.05 ^a	1.90±0.17 ^b	0.24±0.06 ^b	1.25±0.03 ^c	nd	2.98±0.21 ^a	0.05±0.00 ^c
麦芽酚		3.35±0.84 ^b	1.74±0.11 ^c	5.24±0.87 ^a	2.84±0.50 ^b	3.97±0.81 ^{ab}	3.58±0.34 ^{ab}	3.76±0.16 ^{ab}	3.77±0.49 ^a
小计		4.88±0.91 ^c	4.67±0.17 ^c	11.17±2.16 ^a	6.47±0.32 ^b	7.14±0.40 ^b	10.19±0.56 ^a	8.47±0.12 ^b	9.60±0.61 ^a
黄烷醇 儿茶素		132.59±2.40 ^d	0.07±0.01 ^c	202.59±4.19 ^b	0.25±0.05 ^b	212.06±2.60 ^a	0.15±0.02 ^c	183.23±1.59 ^c	0.49±0.07 ^a
原花青素 B ₂		52.32±0.74 ^d	nd	62.55±2.07 ^c	nd	84.46±1.20 ^a	nd	69.83±1.27 ^b	nd
表儿茶素		4.58±0.19 ^a	0.05±0.01 ^a	3.06±0.64 ^b	nd	3.96±0.42 ^a	nd	2.97±0.34 ^b	nd
小计		189.49±2.42 ^d	0.12±0.04 ^c	268.19±9.71 ^b	0.25±0.05 ^b	300.48±3.48 ^a	0.15±0.02 ^c	256.03±2.60 ^c	0.49±0.07 ^a
黄烷酮 香叶木苷		36.94±0.84 ^b	1.30±0.27 ^a	37.48±0.89 ^b	0.61±0.15 ^b	34.11±1.13 ^b	0.67±0.11 ^b	42.13±1.55 ^a	0.92±0.15 ^b
香叶木素		60.07±0.69 ^a	5.52±0.26 ^a	10.92±0.41 ^c	1.01±0.09 ^b	0.08±0.01 ^d	nd	13.81±0.47 ^b	1.08±0.10 ^b
小计		97.00±0.79 ^a	6.82±0.32 ^a	48.41±1.02 ^d	1.62±0.08 ^b	34.19±1.13 ^c	0.67±0.11 ^c	55.94±1.66 ^b	2.00±0.22 ^b
总酚酸		59.78±2.23 ^c	234.62±6.03 ^b	155.86±6.98 ^a	170.56±7.26 ^d	137.99±1.67 ^b	213.84±6.82 ^c	133.90±1.07 ^b	330.17±3.14 ^a
总黄酮		301.20±3.68 ^c	11.75±0.46 ^b	342.63±7.27 ^b	12.08±0.84 ^b	367.96±5.56 ^a	14.62±1.12 ^a	339.35±3.41 ^b	15.13±0.25 ^a
总多酚		360.98±4.06 ^c	246.36±5.74 ^b	498.48±13.20 ^a	182.64±8.08 ^d	505.95±6.67 ^a	228.47±5.92 ^c	473.25±2.36 ^b	345.30±3.13 ^a

† nd 表示未检出;字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

酸(游离型)、紫杉叶素(游离型)、麦芽酚(结合型)、山奈酚(结合型)为主要增加的酚类物质组分,分别为CK组的1.94, 1.30, 1.18, 10.28, 2.17, 5.51倍; Santin 等^[32]研究发现,UVT 处理能够触发苯丙烷和类黄酮生物合成,且查尔酮合成酶(CHS)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)、查尔酮异构酶

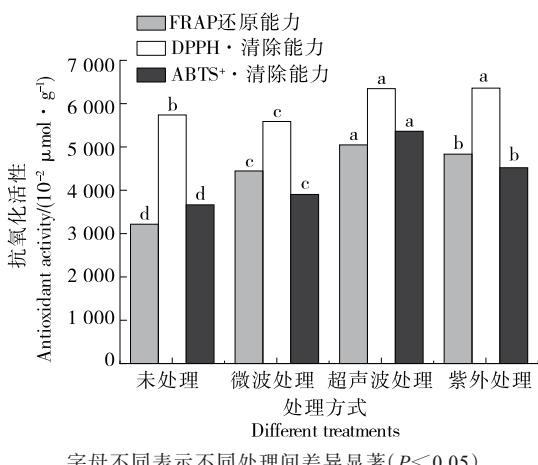
(CHI)和黄酮醇合成酶(FLS)被激活,使得黄酮醇类物质含量增加,与试验结果一致。UT 处理的总黄酮含量最高,达到(382.59±4.73) mg/100 g,与 CK 组相比提高了22.26%。酚类物质组分中 UT 处理的黄酮和黄烷醇总量最高,分别为 CK 组的 2.99 倍和 1.59 倍。此外,3 种处理中

MT 处理对游离酚酸具有最好的富集效果, 其游离酚酸含量与 CK 组相比提高了 2.61 倍。酚类物质组分中 MT 处理的羟基苯甲酸含量最高, 为 CK 组的 3.35 倍, 其中原儿茶酸(游离型)、苯甲酸(游离型和结合型)、丁香酸(游离型)、对羟基苯甲酸(游离型)、水杨酸(游离型和结合型)及藜芦酸(游离型和结合型)为主要增加的酚类物质组分, 均为 CK 组的 2 倍以上。这可能是因为 MT 处理破坏了青稞的细胞结构, 使得与细胞蛋白、多糖交联的结合酚结构遭到破坏, 使结合酚转化为游离酚, 提高了游离酚含量^[33]。此外, MT 处理也降低了结合酚酸含量, 可能是因为植物细胞在微波场的作用下迅速升温, 富含自由水的胞内结构产生高压^[34], 细胞无法承受高压而导致细胞膜、细胞壁等结构破裂^[35], 因此部分酚类物质流失。

此外, 以游离态形式存在的原儿茶酸、苯甲酸、香草酸、丁香酸、水杨酸、木犀草素、异槲皮素、紫杉叶素及结合形态存在的邻香豆酸、苯甲酸、水杨酸、藜芦酸、木犀草素、异牡荆黄素、杨梅素、山奈酚、麦芽酚、儿茶素为 3 种处理黑青稞共有的主要增加酚类物质, 与 CK 组相比均提高 1.5 倍以上, 而经 3 种处理后, 结合型的芦丁、表儿茶素均未检出, 经 UT 处理后杨梅素(游离型)、芦丁(游离型)、紫杉叶素(结合型)均未检出, 可能是由于一些酚类物质组分在处理过程中发生了降解^[36]或参与其他组分化学反应导致含量降低^[37]。

2.5 对青稞体外抗氧化活性的影响

由图 3 可知, 与 CK 组相比, 经 3 种处理后黑青稞抗氧化活性影响显著, 其中经 MT 处理的 DPPH⁺清除能力显著降低($P<0.05$), 而 FRAP 还原能力、ABTS⁺清除能力显著高于 CK 组, 而其他两种处理方式均显著提高了黑青稞的体外抗氧化活性, 其中 UT 处理的 3 种体外抗氧化活



字母不同表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 3 处理方式对黑青稞抗氧化活性的影响

Figure 3 Effect of different treatments on antioxidant activity of black highland barley

性均最高。采用抗氧化活性综合指数法(APC)对不同处理后的黑青稞体外抗氧化活性进行综合评价, 结果见表 3。由表 3 可知, APC 综合指数排名依次为 UT (99.94%) > UVT (93.35%) > MT (82.91%) > CK (74.10%), 且 UT 处理、UVT 处理及 MT 处理的 APC 综合指数分别为 CK 组的 1.35, 1.26, 1.12 倍。总体来看, UT 处理能够更好地提高黑青稞的抗氧化能力。

表 3 不同方式处理后黑青稞的体外抗氧化活性综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of antioxidant activity of black highland barley *in vitro* after different treatments

组别	APC 指数/%			APC 综合指数/%	APC 综合排名
	FPAP	DPPH ⁺	ABTS ⁺		
CK	63.73	90.26	68.31	74.10	4
MT 处理	88.06	87.88	72.77	82.91	3
UT 处理	100.00	99.82	100.00	99.94	1
UVT 处理	95.73	100.00	84.31	93.35	2

2.6 黑青稞酚类物质与抗氧化活性的相关性分析

为了明确不同处理黑青稞中游离酚、结合酚和总酚含量与其抗氧化活性之间的关系, 选取不同处理下黑青稞的特征酚类单体和处理间变化较显著的单体进行皮尔逊相关分析, 结果见表 4。由表 4 可知, 不同类型多酚含量与 3 种抗氧化活性分别存在正相关, 其中游离酚与 FRAP 还原能力存在极显著正相关($P<0.01, r=0.992$), 结合酚与 DPPH⁺清除能力存在显著正相关($P<0.05, r=0.967$), 而总酚含量与 ABTS⁺·清除能力呈显著正相关($P<0.05, r=0.970$), 与 Boubakri 等^[38]的研究结果一致。总黄酮含量与 FRAP 还原能力呈显著正相关($P<0.05, r=0.964$), 而游离型黄酮含量与 ABTS⁺·清除能力呈极显著正相关($P<0.01, r=0.998$)。由于不同类型的单体酚类对不同的抗氧化活性评价方法具有选择性^[39], FRAP 还原能力还与木犀草素总量及结合型麦芽酚呈极显著或显著正相关, 而与结合型紫杉叶素呈极显著负相关, 而 ABTS⁺·清除能力与异牡荆黄素及原花青素 B₂呈显著正相关。赵萌萌等^[40]研究表明, 青稞多酚中阿魏酸与 DPPH⁺清除能力呈显著正相关, 与试验结果存在差异, 可能是由于青稞品种及其生长环境的不同引起多酚的组成和含量不同, 此外还与多酚的富集方式密切相关^[23]。

3 结论

对比了不同处理方式对黑青稞籽粒酚类物质及抗氧化活性的影响。结果表明, 与未处理相比, 经 3 种方式处理后黑青稞的脂肪含量均显著增加($P<0.05$), 而纤维含量均显著降低($P<0.05$)。不同处理方式对黑青稞中不同

表4 不同方式处理下黑青稞酚类物质与抗氧化活性的相关性分析[†]

Table 4 Correlation analysis between phenolics and antioxidant activity of black highland barley under different treatments

酚类	FRAP还原能力			DPPH·清除能力			ABTS ⁺ ·清除能力		
	游离型	结合型	总量	游离型	结合型	总量	游离型	结合型	总量
阿魏酸	0.936	0.221	0.355	0.878	0.775	0.855	0.948	0.321	0.449
咖啡酸	0.080	-0.933	-0.930	0.220	-0.370	-0.360	-0.249	-0.609	-0.619
邻香豆酸	0.599	0.726	0.704	-0.177	0.095	0.022	0.218	0.555	0.474
原儿茶酸	0.588	-0.442	0.369	0.200	-0.887	-0.110	0.057	-0.848	-0.221
苯甲酸	0.622	0.609	0.624	-0.152	-0.131	-0.149	0.204	0.086	0.178
香草酸	0.861	0.199	0.781	0.471	0.551	0.546	0.442	0.055	0.388
丁香酸	0.617	-0.002	0.469	0.275	-0.142	0.170	0.110	-0.486	-0.054
水杨酸	0.847	0.445	0.572	0.215	0.273	0.281	0.411	-0.023	0.075
藜芦酸	0.359	0.585	0.572	-0.257	0.486	0.344	-0.242	0.194	0.104
木犀草素	0.967*	0.927	0.991**	0.782	0.355	0.697	0.937	0.593	0.879
异牡荆黄素	0.693	0.770	0.719	0.735	0.122	0.715	0.970*	0.552	0.970*
杨梅素	-0.062	0.697	0.461	-0.771	0.613	-0.264	-0.490	0.933	0.237
山奈酚	0.092	0.724	0.732	-0.566	0.808	0.695	-0.476	0.540	0.446
紫杉叶素	0.697	-0.994**	0.547	0.433	-0.754	0.304	0.252	-0.849	0.065
麦芽酚	0.353	0.970*	0.884	-0.447	0.785	0.272	-0.099	0.791	0.489
儿茶素	0.913	0.562	0.914	0.357	0.448	0.358	0.686	0.154	0.686
原花青素B ₂	0.896	-	0.896	0.780	-	0.780	0.983*	-	0.983*
多酚	0.992**	0.609	0.855	0.587	0.967*	0.935	0.780	0.900	0.970*
黄酮	0.826	0.730	0.964*	0.809	0.051	0.698	0.998**	0.224	0.921

† *表示在0.05水平上差异显著; **表示在0.01水平上差异显著。

形态的多酚及黄酮含量存在差异,除微波处理的结合酚含量显著低于未处理组外,其他处理的不同形态的多酚及黄酮含量均显著增加,其中超声波处理对酚类物质的提高具有较好的优势,与未处理相比,总酚和总黄酮含量分别提高了18.72%和46.22%。UHPLC-MS/MS结果表明,3种方式处理后黑青稞的羟基苯甲酸类、黄酮醇类、黄烷醇类含量均显著提高($P<0.05$),而黄烷酮类含量均显著降低($P<0.05$),其中紫外处理黑青稞的羟基肉桂酸和黄酮醇总量最高,超声波处理黑青稞的黄酮和黄烷醇总量最高,微波处理黑青稞的羟基苯甲酸含量最高。3种方式处理后黑青稞的APC综合指数排名依次为超声波(99.94%)>紫外(93.35%)>微波(82.91%)>未处理(74.10%),其中超声波处理黑青稞的APC指数最高、抗氧化活性最强,为未处理黑青稞的1.35倍。总体而言,不同处理方式对黑青稞酚类物质影响显著,超声波处理对黑青稞酚类物质及抗氧化活性具有较好的提升效果。后续研究可采用组学技术并结合关键酶活性测定进一步解析3种处理方式对黑青稞多酚含量的提升作用机理。

参考文献

[1] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: chemical

composition, bioactive compounds, health effects, and applications[J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.

[2] CHOO T M, VIGIER B, HO K M, et al. Comparison of black, purple, and yellow barleys[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2005, 52(2): 121-126.

[3] SPARKS G A, MALCOLM J P. Barley identification by grain characters in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Experimental Agriculture, 1978, 6(1): 1-10.

[4] LIU Z F, YAO Z J, YU C Q, et al. Assessing crop water demand and deficit for the growth of spring highland barley in Tibet, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3): 541-551.

[5] GUO T L, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 109-117.

[6] 吴海毓,何冰桃,杨静,等.富集多酚青稞红曲米发酵工艺优化及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2024,40(8): 135-143, 151.

WU H Y, HE B T, YANG J, et al. Optimization of fermentation process conditions of polyphenol-enriched highland barley monascus rice and its antioxidant activity research[J]. Food &

- Machinery, 2024, 40(8): 135-143, 151.
- [7] 郭俊玲, 张杰, 张文刚, 等. 超声波协同萌发处理富集黑青稞多酚的工艺优化及其酚酸组成分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 207-215.
GUO J L, ZHANG J, ZHANG W G, et al. Process optimization of ultrasonic co-germination for enriching black highland barley polyphenols and analysis of phenolic acid composition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 207-215.
- [8] 周心怡, 李晓春, 周映君, 等. 红曲霉发酵对罗布麻多酚物质含量及种类的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 128-135.
ZHOU X Y, LIU X C, ZHOU Y J, et al. Influence of *Monascus* on polyphenol content and species in fermented *Apocynum venetum* L[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 128-135.
- [9] LI J X, ZHANG H, YANG X J, et al. Trapping of reactive carbonyl species by fiber-bound polyphenols from whole grains under simulated physiological conditions[J]. Food Research International, 2022, 156: 111142.
- [10] 郭俊玲, 党斌, 张杰. 谷物多酚的富集方法研究进展[J]. 青海农林科技, 2022(4): 51-55, 75.
GUO J L, DANG B, ZHANG J. Research progress on enrichment methods of cereal polyphenols[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2022(4): 51-55, 75.
- [11] MOONGNGARM A, SAETUNG N. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 782-788.
- [12] 张玲, 郑万财, 兰永丽, 等. 藜麦富硒萌发工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 175-182.
ZHANG L, ZHENG W C, LAN Y L, et al. Optimization of selenium-enriched germination process of quinoa and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 175-182.
- [13] CHU R, UAILA E, ISMAIL T, et al. Effect of short-term *Lactic* fermentation on polyphenol profile and antioxidant capacity in white and red quinoa varieties[J]. Foods, 2024, 13 (15): 2 413.
- [14] CHEN K Y, GAO C C, HAN X M, et al. Co-fermentation of lentils using lactic acid bacteria and *Bacillus subtilis* natto increases functional and antioxidant components[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 475-483.
- [15] 刘秉杰, 崔春丹, 陈中. 乳杆菌发酵对黑米多酚含量及组成的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 114-120.
LIU B J, CUI C D, CHEN Z. Effects of *Lactobacillus* fermentation on the content and composition of black rice polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 114-120.
- [16] KARAKAS F P, BOZAT B G. Fluctuation in secondary metabolite production and antioxidant defense enzymes in *in vitro* callus cultures of goat's rue (*Galega officinalis*) under different abiotic stress treatments[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2020, 142: 401-414.
- [17] 贾丽婷. 不同预处理对黑米蒸煮食用品质及营养特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 48-49.
JIA L T. Effects of different pretreatments on cooking quality and nutritional properties of black rice[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022: 48-49.
- [18] 陈旭, 杨润强, 顾振新. UV-B 辐照下大豆发芽富集异黄酮品种筛选及发芽动力学[J]. 食品科学, 2016, 37 (13): 107-113.
CHEN X, YANG R Q, GU Z X. Cultivar selection for isoflavone accumulation and kinetics of soybean germination under UV-B radiation[J]. Food Science, 2016, 37(13): 107-113.
- [19] HASAN M M, BASHIR T, BAE H H. Use of ultrasonication technology for the increased production of plant secondary metabolites[J]. Molecules, 2017, 22(7): 1 046.
- [20] 陈培栋. 微波处理对糙米理化性质影响及作用机理研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2018: 21-25.
CHEN P D. Effect of microwave treatment on physicochemical properties of brown rice and its mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2018: 21-25.
- [21] JI H B, TANG W, ZHOU X L, et al. Combined effects of blue and ultraviolet lights on the accumulation of flavonoids in Tartary buckwheat sprouts[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2016, 66(2): 93-98.
- [22] JIN H M, DANG B, ZHANG W G, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors[J]. Molecules, 2022, 27(11): 3 411.
- [23] ZHANG J, GUO J L, DANG B, et al. Enhancement of polyphenols and antioxidant activity in germinated black highland barley by ultrasonication[J]. Molecules, 2023, 28(9): 3 679.
- [24] 张杰, 党斌, 张文刚, 等. 不同加工方式对体外模拟胃肠消化黑青稞酚类物质含量及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 78-86.
ZHANG J, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of different processing methods on phenolic content and antioxidant activity of black hulless barley in *vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food Science, 2022, 43(21): 78-86.
- [25] 申瑞玲, 王珍, 董吉林. 不同热处理对燕麦全谷营养品质及消化性的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 188-191.
SHEN R L, WANG Z, DONG J L. Effects of heat treatment on nutritional quality of wholegrain oat[J]. The Food Industry, 2016, 37(7): 188-191.
- [26] 渠皓琳. 不同熟化方式对花生芽酚类物质含量及食用品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 28-29.
QU H L. Effects of different cooking methods on phenolic content and edible quality of peanut sprouts[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 28-29.
- [27] KENTISH S, FENG H. Applications of power ultrasound in

- food processing[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2014, 5(1): 263-284.
- [28] HUANG X, YAO J W, ZHAO Y Y, et al. Efficient rutin and quercetin biosynthesis through flavonoids-related gene expression in *Fagopyrum tataricum gaertn.* hairy root cultures with UV-B irradiation[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 63.
- [29] JOGIHALLI P, SINGH L, SHARANAGAT V S. Effect of microwave roasting parameters on functional and antioxidant properties of chickpea (*Cicer arietinum*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 223-233.
- [30] HAYAT K, ABBAS S, HUSSAIN S, et al. Effect of microwave and conventional oven heating on phenolic constituents, fatty acids, minerals and antioxidant potential of fennel seed[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111610.
- [31] ZHOU R, YANG H B, LU T, et al. Ultraviolet radiation promotes the production of hispidin polyphenols by medicinal mushroom *Inonotus obliquus*[J]. Fungal Biology, 2022, 126(11/12): 775-785.
- [32] SANTIN M, SIMONI S, VANGELISTI A, et al. Transcriptomic analysis on the peel of UV-B-exposed peach fruit reveals an upregulation of phenolic- and UVR8-related pathways[J]. Plants, 2023, 12(9): 1 818.
- [33] 张苗. 微波预处理对油菜籽及其加工产品中主要芥子酸衍生物和抗氧化活性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 17-18.
- ZHANG M. Effect of microwave treatment on sinapic acid derivatives in rapeseeds and products and antioxidant activities [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015: 17-18.
- [34] ZHOU Y H, STANISZEWSKA I, LIU Z L, et al. Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111464.
- [35] ZIELINSKA M, ROPELEWSKA E, XIAO H W, et al. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: quality properties[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(13): 2 212-2 264.
- [36] BUDARAJU S, MALLIKARJUNAN K, ANNOR G, et al. Effect of pre-treatments on the antioxidant potential of phenolic extracts from barley malt rootlets[J]. Food Chemistry, 2018, 266: 31-37.
- [37] WILSON K E, THOMPSON J E, HUNER N P A, et al. Effects of ultraviolet-A exposure on ultraviolet-B-induced accumulation of specific flavonoids in *brassica napus*[J]. photochemistry and Photobiology, 2001, 73(6): 678-684.
- [38] BOUBAKRI H, JDEY A, TAAMALLI A, et al. Phenolic composition as measured by liquid chromatography/mass spectrometry and biological properties of Tunisian barley[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup2): 1 783-1 797.
- [39] ZHANG W G, LAN Y L, DANG B, et al. Polyphenol profile and in vitro antioxidant and enzyme inhibitory activities of different solvent extracts of highland barley bran[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1 665.
- [40] 赵萌萌, 张文刚, 党斌, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉多酚组成及抗氧化活性的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 291-298.
- ZHAO M M, ZHANG W G, DANG B, et al. Effects of ultra-micro-crushing on composition of polyphenols and antioxidant activity of barley bran powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 291-298.