

引用格式:

丰程凤, 崔文玉, 夏智慧, 罗凯云, 程安玮. 蒸汽爆破预处理油菜籽的多酚得率及抗氧化活性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(5): 609–615.

FENG C F, CUI W Y, XIA Z H, LUO K Y, CHENG A W. Polyphenols yield and antioxidant capacity of rapeseed pretreated by steam explosion[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(5): 609–615.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 蒸汽爆破预处理油菜籽的多酚得率及抗氧化活性

丰程凤, 崔文玉, 夏智慧, 罗凯云, 程安玮\*

(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

**摘 要:** 油菜籽经 0.4、0.7、1.0 MPa 等 3 种压力及维压 1、3 min 的蒸汽爆破预处理后, 采用低温压榨法分离菜籽饼及油, 分别测定其多酚得率、组成及抗氧化活性, 探究蒸汽爆破预处理对其的影响。结果表明: 相同维压时间下提高爆破压力或相同的压力下延长维压时间, 制备的菜籽油颜色逐渐加深; 经蒸汽爆破处理后菜籽饼多酚得率为 7.12~8.42 g/(100 g), 菜籽油多酚得率显著提高, 1.0 MPa 下维压 3 min 时, 菜籽油多酚得率最高, 为 0.56 g/(100 g); 菜籽饼中生成了 2,6-二甲氧基-4-乙烯基苯酚(canolol)、儿茶素、咖啡酸等物质, 其中 canolol 的转化生成量最大, 且一部分迁移到菜籽油中, 0.7 MPa 下维压 3 min 时, 菜籽饼和油中 canolol 含量达到最大, 分别为 12 120.00、4680.00 mg/kg; DPPH、ABTS 和 FRAP 法测定的菜籽油提取物的抗氧化能力显著提升, 但菜籽饼的抗氧化能力变化幅度较小; 多酚得率与提取物的抗氧化能力之间存在显著或极显著的正相关。可见, 蒸汽爆破可作为提高菜籽油中多酚含量及抗氧化活性的一种有效预处理技术, 蒸汽压力 0.7 MPa、维压 3 min 可作为一个较优的汽爆条件用于油菜籽的加工处理。

**关 键 词:** 油菜籽; 菜籽饼; 菜籽油; 蒸汽爆破; 多酚; 抗氧化活性

中图分类号: TS201.1; S565.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)05-0609-07

## Polyphenols yield and antioxidant capacity of rapeseed pretreated by steam explosion

FENG Chengfeng, CUI Wenyu, XIA Zhihui, LUO Kaiyun, CHENG Anwei\*

(School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** Rapeseed were pretreated by steam explosion at 0.4, 0.7 and 1.0 MPa and at maintenance pressure for 1 and 3 min. The low temperature pressing method was used to separate rapeseed cake and oil, and their polyphenol yield, composition and antioxidant capacity were determined respectively to investigate the effects of steam explosion pretreatment on them. The results showed that the color of the prepared rapeseed oil was gradually deepened by either increasing the bursting pressure at the same dimensional pressure time or increasing the dimensional pressure time at the same pressure. After the steam explosion treatment, the polyphenol yields of rapeseed cake were 7.12-8.42 g/(100 g). The polyphenol yields of rapeseed oil were significantly increased with the highest polyphenol yield 0.56 g/(100 g) at the time of dimensional pressure for 3 min at 1.0 Mpa. 2,6-dimethoxy-4-vinylphenol(canolol), catechins, caffeic acid etc were generated in rapeseed cake, of which canolol had the largest amount of conversion generation and part of it migrated to rapeseed oil, and the contents of canolol in rapeseed cake and oil reached the maximum when the dimensional pressure was maintained for 3 min at 0.7 MPa, which was 12 120.00 and 4680.00 mg/kg. The antioxidant capacity of rapeseed oil extracts determined by DPPH, ABTS and FRAP methods was significantly increased, while the antioxidant capacity of rapeseed cake showed a smaller change. A significant or highly significant positive correlation between polyphenol yield

收稿日期: 2022-04-14

修回日期: 2023-09-21

基金项目: 湖南省教育厅项目(19A236); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MC072)

作者简介: 丰程凤(1999—), 女, 贵州清镇人, 硕士研究生, 主要从事农产品精深加工研究, 2502730800@qq.com; \*通信作者, 程安玮, 博士, 教授, 主要从事生物活性物质与功能食品研究, anweich@126.com

and antioxidant capacity of the extracts were observed. It can be seen that steam explosion can be used as an effective technology for pretreatment to improve the polyphenol content and antioxidant capacity in rapeseed oil, and steam pressure of 0.7 MPa, dimensional pressure of 3 min can be used as an optimal steam explosion conditions for the processing of rapeseed.

**Keywords:** rapeseed; rapeseed cake; rapeseed oil; steam explosion; polyphenols; antioxidant capacity

油菜籽中富含多酚,其多酚含量是其他油料种子的10~30倍<sup>[1]</sup>。菜籽多酚主要为酚酸类,以酯化态、游离态的形式为主。酯化酚酸中最主要的是芥子碱(芥子碱胆碱酯),游离态最主要的是芥子酸,另外还含有少量的

-羟基苯甲酸、香草酸、儿茶酸、丁香酸、*p*-香豆酸和咖啡酸<sup>[1-2]</sup>。菜籽含油量约为38%~45%,剩余的为饼粕,通常情况下多酚主要分布在饼粕中,菜籽油中含量较少。

蒸汽爆破是一种高效的热处理技术,逐渐被应用到植物及加工副产物的活性成分提取中,表现出极好的效果<sup>[3-5]</sup>。蒸汽爆破处理植物原料后能形成较大的孔洞和细胞间隙,有利于多酚类物质的释放,从而提高提取物的抗氧化活性<sup>[6-8]</sup>。与其他预处理方法相比,蒸汽爆破具有能耗低、无有害化学物质的产生以及适合工业化等优点<sup>[9]</sup>。

在菜籽油的生产过程中,菜籽需经过焙烤加热预处理以钝化种子中的酶活性,加大细胞壁的通透性。蒸汽爆破具有高温和高压的双重作用,对油菜籽的处理效果比单一的加热处理效果更明显,对菜籽中多酚在菜籽饼和油中的迁移和分布也具有一定的影响。笔者通过不同强度的蒸汽爆破预处理油菜籽,采用低温压榨分离出菜籽饼和菜籽油,探究蒸汽爆破预处理对菜籽饼及油中酚类物质组成、迁移转化及其抗氧化活性的影响,并进行相关性分析,旨在为油菜籽高值化加工技术的发展和高品质、高附加值菜籽油产品的开发和应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与试剂及主要设备

供试双低油菜籽,产自江苏高邮。没食子酸(纯度99%), Trolox(水溶性 V-E, 纯度97%), 2,4,6-三(2'-吡啶基)-1,3,5-三嗪(TPTZ, 99%), 均为标准品(麦克林生化科技有限公司); DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)和 ABTS(2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)试剂盒(南京建成生物工程研究

所); 乙腈、甲酸均为色谱纯, 福林酚、正己烷、甲醇、三氯化铁、冰乙酸等试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

QB-300型间歇蒸汽爆破仪(鹤壁 Gentle 生物能源有限公司产品); 家庭榨油机(乐清市韩皇电器科技有限公司产品); UV-5200 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司产品); 离心机 H1850(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司产品); 粉碎机 FW100(天津市泰斯特仪器有限公司产品); 旋转蒸发器 RE-52AA(上海亚荣生化仪器厂产品); 数控超声波清洗器 KQ-800 DE(昆山市超声仪器有限公司产品); 液质联用仪: LC-MS/MS(安捷伦 1100; 三重四级杆质谱 API 4000)。

### 1.2 原料蒸汽爆破预处理及菜籽饼和油的分离

选取0.4、0.7、1.0 MPa等3种压力,相应的温度分别为143.64、164.98、179.92 °C, 维压时间分别设为1、3 min, 共6个蒸汽爆破处理组, 分别记为 SE1(0.4 MPa, 1 min), SE2(0.4 MPa, 3 min), SE3(0.7 MPa, 1 min), SE4(0.7 MPa, 3 min)、SE5(1.0 MPa, 1 min)、SE6(1.0 MPa, 3 min)。取大约500 g的油菜籽样品置于 QB-300 型间歇蒸汽爆破仪的物料仓中, 通入饱和水蒸气, 分别设置压力和维压时间, 进行爆破处理, 完成爆破后瞬时释压(0.008 75 s)。以未进行爆破的油菜籽为对照(CK)。

采用低温压榨法, 在50 °C下采用榨油机压榨获得菜籽油和菜籽饼; 油过滤后和菜籽饼置于4 °C贮藏、备用。

### 1.3 菜籽饼和油中多酚得率与组成及抗氧化活性的测定

参照王未君等<sup>[10]</sup>的方法萃取菜籽饼及油中的多酚。采用福林酚法<sup>[11]</sup>测定菜籽饼及油提取液中的多酚总量, 计算多酚得率。采用 LC-MS/MS<sup>[12]</sup>定量测定菜籽饼及油提取液中的多酚组分, 其中, 色谱柱为 Agilent Poroshell 120 EC-C18 2.7 μm(3 mm×50

mm), 流动相 A 为体积分数 0.5% 甲酸水溶液, 流动相 B 为乙腈溶液, 流速 0.6 mL/min, 进样量 10  $\mu$ L, 柱温 35  $^{\circ}$ C, PDA 检测于 200~360 nm 连续扫描。参照 THAIPONG 等<sup>[13]</sup>的方法及试剂盒说明书, 采用 DPPH、ABTS 和 FRAP(铁离子还原能力)法分别测定菜籽饼及油提取液的 DPPH 自由基清除力、ABTS 自由基清除力及铁离子还原力。

#### 1.4 统计分析

每组试验重复 3 次, 结果以平均数 $\pm$ 标准差表示。运用 SPSS 25.0 对数据进行 ANOVA 方差分析; 采用 Person 相关分析法对菜籽饼及油提取液的抗氧化能力与多酚得率之间的相关性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸汽爆破对油菜籽外观及色泽的影响

油菜籽在不同蒸汽爆破条件下的外观如图 1 所示。未爆破油菜籽的颗粒完整光滑; 在相同维压时间下随着爆破压力的增加, 油菜籽的颜色由青黑色逐渐变黄, 继而变为黑褐色, 油菜籽出现爆裂现象, 且数量逐渐增加, 这是在高温和高压的双重作用下, 汽爆处理破坏了细胞壁结构; 相同压力下, 维压时间延长, 油菜籽爆裂数量增加, 且爆裂后的油菜籽颜色加深。由图 2 可知, 菜籽油颜色在相同维压时间下随着蒸汽爆破压力的增加而加深, 在相同压力下随维压时间的延长而加深。

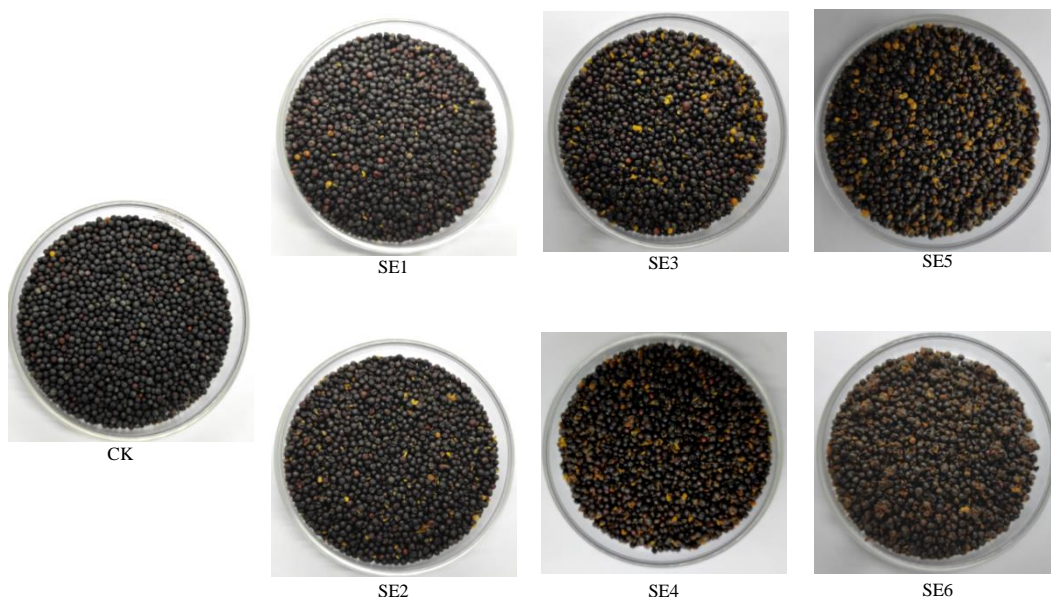


图 1 不同蒸汽爆破条件下油菜籽的外观

Fig.1 Appearance of rapeseed under different steam explosion conditions

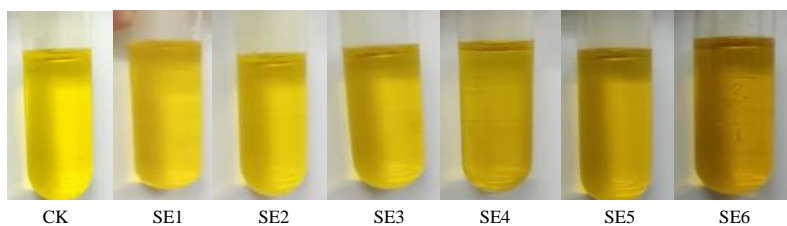


图 2 不同蒸汽爆破条件下低温压榨菜籽油的外观

Fig.2 Appearance of low temperature pressed rapeseed oil under different steam explosion conditions

### 2.2 蒸汽爆破对菜籽饼和油中多酚得率的影响

从表 1 可知: 不同爆破条件下菜籽饼中多酚得率为 7.12~8.42 g/(100 g), CK、SE1、SE3 和 SE6 的菜籽饼中多酚的得率较高, 分别为 8.13、8.33、8.18、8.42 g/(100 g); 爆破后菜籽油中多酚的得率较未处理显著提高, 且相同维压时间下随爆破压力

的增加或相同压力下随维压时间的延长, 多酚得率均显著增加, 当爆破压力为 0.7 MPa 时, 维压时间从 1 min 延长到 3 min, 菜籽油中多酚得率的增幅较大, SE6 的菜籽油中多酚得率最高, 为 0.56 g/(100 g), 比 CK 的增加了 6 倍。对比来看, 蒸汽爆破对菜籽油中多酚得率的影响比对菜籽饼的更大。

表 1 不同蒸汽爆破条件下菜籽饼和油的多酚得率  
Table 1 Polyphenol yields of rapeseed cake and oil under different steam explosion conditions

处理	多酚得率/(g (100 g) <sup>-1</sup> )	
	菜籽饼	菜籽油
CK	(8.13±0.42)ab	(0.08±0.00)e
SE1	(8.33±0.16)a	(0.16±0.01)d
SE2	(7.12±0.34)b	(0.26±0.02)c
SE3	(8.18±0.29)ab	(0.27±0.01)c
SE4	(7.64±0.46)b	(0.49±0.02)b
SE5	(7.59±0.33)b	(0.50±0.00)b
SE6	(8.42±0.10)a	(0.56±0.01)a

同列不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

2.3 蒸汽爆破对菜籽饼和油中多酚组成及含量的影响

从表 2 可知: CK 菜籽饼中的多酚以芥子碱为主, 其次是芥子酸, 有少量的水杨酸、肉桂酸、阿魏酸、香叶木素、原儿茶酸、丁香酸、对香豆酸等成分; 蒸汽爆破处理后, 原儿茶酸、肉桂酸(SE1 除外)、水杨酸、丁香酸的含量显著增加, 但阿魏酸、香叶木素(SE1 除外)的含量显著降低, 且菜籽饼中新出现了 2,6-二甲氧基-4-乙基苯酚(canolol)、儿茶素、咖啡酸等 3 种成分, 且 canolol 的含量较高,

表 2 不同蒸汽爆破条件下菜籽饼和油中多酚的组成及含量

Table 2 Compositions and contents of polyphenols in rapeseed cake and oil under different steam explosion conditions								mg/kg
来源	处理	芥子碱	canolol	芥子酸	芹菜素	水杨酸	肉桂酸	儿茶素
菜籽饼	CK (30 760.00±75.97)a	—	—	(2899.00±5.29)a	(1832.00±1.00)e	(66.40±0.53)f	(44.40±0.20)f	—
	SE1 (28 080.00±60.70)b	—	(2432.00±3.61)f	(2252.00±3.46)c	(2236.00±1.73)c	(95.60±1.64)e	(32.40±0.10)g	(412.00±0.85)e
	SE2 (27 080.00±103.38)e	—	(6960.00±6.00)d	(2144.00±3.21)d	(2540.00±4.36)a	(117.60±0.56)c	(120.00±1.08)b	(532.00±0.44)c
	SE3 (27 760.00±43.86)c	—	(4760.00±5.29)e	(2392.00±4.36)b	(2376.00±3.61)b	(101.60±1.57)d	(146.00±0.53)a	(464.00±0.95)d
	SE4 (25 720.00±33.81)f	—	(12 120.00±25.71)a	(1528.00±1.73)e	(1568.00±3.61)f	(135.60±0.61)a	(63.20±0.62)e	(560.00±1.47)a
	SE5 (27 600.00±107.79)d	—	(8560.00±10.82)c	(2140.00±2.00)d	(2144.00±1.73)d	(119.60±0.46)b	(98.80±0.62)d	(536.00±0.75)b
	SE6 (17 680.00±51.12)g	—	(9920.00±7.00)b	(768.00±1.00)f	—	(135.20±1.04)a	(117.60±0.79)c	(175.60±0.30)f
菜籽油	CK	—	(131.60±0.10)g	(0.58±0.00)g	—	—	(11.76±0.01)c	—
	SE1	(5.40±0.00)c	(196.40±0.56)f	(1.27±0.00)f	(42.80±0.10)e	(1.55±0.00)f	(11.28±0.01)d	—
	SE2	(3.76±0.00)e	(772.00±1.73)d	(2.88±0.00)c	(46.80±0.03)d	(1.60±0.00)e	(12.11±0.02)b	—
	SE3	(7.76±0.01)a	(560.00±2.46)e	(3.45±0.01)a	(64.40±0.05)a	(1.82±0.01)d	(13.88±0.01)a	—
	SE4	(6.96±0.01)b	(4680.00±3.38)a	(2.98±0.00)b	(47.60±0.05)c	(2.38±0.01)b	(8.20±0.03)e	—
	SE5	(4.72±0.00)d	(3416.00±1.32)b	(1.50±0.01)d	(52.00±0.14)b	(2.06±0.00)c	(11.28±0.00)d	—
	SE6	(1.78±0.00)f	(1900.00±1.20)c	(1.33±0.00)e	(26.08±0.01)f	(2.48±0.01)a	(7.04±0.01)f	—
来源	处理	阿魏酸	香叶木素	原儿茶酸	丁香酸	对香豆酸	咖啡酸	合计
菜籽饼	CK	(40.80±0.46)a	(20.28±0.04)b	(19.56±0.01)g	(5.36±0.00)g	(0.75±0.00)f	—	(35 688.55±79.32)e
	SE1	(26.44±0.04)d	(20.72±0.03)a	(112.80±0.12)f	(10.6±0.03)f	(3.21±0.00)e	(3.97±0.00)b	(35 717.74±68.10)e
	SE2	(23.88±0.01)e	(13.44±0.03)e	(184.00±0.83)d	(17.88±0.07)b	(3.97±0.01)c	(4.00±0.01)a	(39 740.77±94.81)c
	SE3	(30.48±0.04)c	(17.92±0.01)c	(156.40±0.46)e	(13.72±0.01)e	(4.92±0.01)a	(2.72±0.00)c	(38 225.76±38.93)d
	SE4	(18.12±0.01)f	(13.04±0.04)f	(240.80±0.21)a	(18.56±0.01)a	(3.44±0.00)d	—	(41 988.76±60.77)a
	SE5	(32.16±1.01)b	(15.08±0.05)d	(218.80±0.33)c	(15.12±0.01)d	(4.60±0.01)b	(0.45±0.00)d	(41 484.61±103.57)b
	SE6	(6.24±0.01)g	(6.84±0.01)g	(221.60±0.34)b	(16.40±0.01)c	(0.62±0.00)g	—	(29 048.10±59.56)f
菜籽油	CK	—	(0.15±0.00)b	—	(0.05±0.00)f	—	—	(144.14±0.11)g
	SE1	—	(0.08±0.00)d	—	(0.04±0.00)g	—	—	(258.82±0.52)f
	SE2	—	(0.03±0.00)g	—	(0.07±0.00)e	—	—	(839.25±1.75)d
	SE3	—	(0.07±0.00)e	—	(0.14±0.00)c	—	—	(651.52±2.46)e
	SE4	—	(0.16±0.00)a	—	(0.17±0.00)b	—	—	(4748.45±3.43)a
	SE5	—	(0.06±0.00)f	—	(0.19±0.00)a	—	—	(3487.81±1.18)b
	SE6	—	(0.11±0.00)c	—	(0.11±0.00)d	—	—	(1938.93±1.21)c

同列不同字母示同一来源不同处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

SE4 的最高, 达 12 120 mg/kg。同样的维压时间, 随压力增加, 菜籽饼中芥子碱含量下降。同样的压力, 随维压时间延长, 菜籽饼中芥子碱含量下降。SE6 菜籽饼中芥子碱的含量最低, 且显著低于其他处理的。维压 1 min 时, 菜籽饼中儿茶素含量随压力增加逐渐增加; 维压 3 min 时, 压力从 0.4 MPa 上升到 0.7 MPa, 菜籽饼中儿茶素含量显著增加, 但压力增加到 1.0 MPa 时, 儿茶素含量又显著降低, SE6 的儿茶素含量最低, 仅为 175.60 mg/kg。蒸汽爆破产生了咖啡酸, 但在高强度(SE4、SE6)时又降解消失。维压 3 min 时提高爆破压力芥子酸含量显著降低, 特别是 SE6 的仅为 768.00 mg/kg。与 CK 相比, SE4 的芹菜素含量显著降低, SE6 的则完全降解。合计来看, 蒸汽爆破处理后, 除 SE1 外, 菜籽饼中多酚的总含量显著上升; 维压 1 min 时, 随爆破压力的增加, 多酚的总含量显著增加; 维压 3 min 时, 随爆破压力的增加, 多酚总含量先呈现出上升的趋势, SE4 的最高, 为 41 988.76 mg/kg, 随后继续增加爆破压力, 多酚的总含量又显著降低。

菜籽油中含有的酚类成分种类及含量均比菜籽饼中的少。CK 中主要有 canolol, 达 131.60 mg/kg, 还含有少量的肉桂酸、芥子酸、香叶木素、丁香酸等。蒸汽爆破处理后, canolol 的含量大幅提高, 在各处理中均是含量最高的成分, 特别是 SE4 的含量, 达 4680.00 mg/kg; 其次为芹菜素, 其中 SE3 的含量最高, 为 64.40 mg/kg; 另外, 爆破处理后菜籽油中含有少量的芥子碱、水杨酸。合计来看, 蒸汽爆破处理后菜籽油中多酚的总含量显著提高, SE4 的含量最高, 达 4748.45 mg/kg; 维压 3 min 时, 爆破压力由 0.7 MPa 提高到 1.0 MPa, 总含量显著下降, 同菜籽饼中多酚总量的变化规律基本一致。

2.4 蒸汽爆破对菜籽饼和油提取物的抗氧化活性的影响

从表 3 可知: 菜籽饼提取物的 DPPH 自由基清除力较高, 能达到 80%左右, SE6 的 DPPH 自由基清除力较 CK 的显著提升, 维压 3 min 时, 菜籽饼提取物的 DPPH 自由基清除力随汽爆压力的提高而显著提升; 铁离子还原力为 32.53~44.09 mg/g, SE2 的铁离子还原力最低, 而 SE1 的最高; 维压 1

min 时, 随汽爆压力的提高, ABTS 自由基清除力逐渐降低, 维压 3 min 时, 随汽爆压力的提高, ABTS 自由基清除力显著增加, 其中 SE2 的最低, 为 42.74%。

表 3 蒸汽爆破后菜籽饼和油提取物的抗氧化能力  
Table 3 Antioxidant capacity of polyphenols in rapeseed cake and oil extracts after steam explosion

来源	处理	DPPH/%	FRAP/(mg g <sup>-1</sup> )	ABTS/%
菜籽饼	CK	(78.48±0.13)b	(39.52±0.71)c	(55.31±0.17)a
	SE1	(79.70±0.77)ab	(44.09±0.36)a	(49.42±0.00)b
	SE2	(74.71±0.79)c	(32.53±0.69)e	(42.74±0.51)e
	SE3	(79.37±2.03)ab	(40.60±0.64)b	(47.32±0.59)c
	SE4	(75.87±0.38)c	(34.82±0.66)d	(44.39±0.08)d
	SE5	(76.80±1.48)c	(35.13±0.33)d	(47.03±0.75)c
菜籽油	CK	(13.15±0.64)f	(0.38±0.04)e	(14.67±0.50)f
	SE1	(21.64±0.37)e	(0.48±0.01)d	(17.10±1.25)e
	SE2	(30.82±1.22)d	(0.80±0.07)c	(23.19±1.00)d
	SE3	(33.60±1.16)c	(0.81±0.04)c	(25.76±0.79)c
	SE4	(56.07±0.85)b	(1.36±0.01)b	(37.43±1.17)b
	SE5	(57.00±0.77)b	(1.49±0.03)a	(39.62±0.64)a
	SE6	(61.81±0.21)a	(1.51±0.04)a	(39.81±1.20)a

同列不同字母表示同一来源不同处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

从表 3 还可知: 蒸汽爆破处理显著增加了菜籽油提取物的抗氧化能力, 且随爆破压力和维压时间的增加, DPPH 自由基清除力、铁离子还原力、ABTS 自由基清除力均逐渐提高; CK 菜籽油的 DPPH 清除自由基能力仅为 13.15%, 而 SE6 的达 61.81%; 当爆破压力为 0.7 MPa 时, 维压时间从 1 min 延长到 3 min, DPPH 自由基清除力、铁离子还原力、ABTS 自由基清除力分别从 33.60%、0.81 mg/g、25.76% 提高到 56.07%、1.36 mg/g、37.43%, 增加幅度较大。菜籽油提取物的 DPPH 自由基清除力、铁离子还原力、ABTS 自由基清除力的变化趋势与采用福林酚测定的多酚得率的变化基本一致, 呈正相关性。

2.5 菜籽饼和油中多酚得率与抗氧化活性之间的相关性

从表 4 可以看出, 菜籽饼和油的多酚得率与抗氧化能力均呈现出显著或极显著的正相关性, 菜籽油多酚得率与抗氧化能力之间的相关性明显高于菜籽饼的。

表 4 菜籽饼和油多酚得率与抗氧化能力间的相关系数  
Table 4 Correlation coefficients between polyphenol yield and antioxidant capacity of rapeseed cake and oil

项目	相关系数		
	DPPH	FRAP	ABTS
菜籽饼多酚得率	0.980**	0.893**	0.791*
菜籽油多酚得率	0.999**	0.995**	0.993**

“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别示显著相关( $P<0.05$ )、极显著相关( $P<0.01$ )。

### 3 结论与讨论

本研究中,油菜籽经蒸汽爆破后出现爆裂现象,相同维压时间下提高爆破压力或相同压力下延长维压时间,菜籽爆裂的数量越多,且籽粒颜色及制备的菜籽油的颜色都逐渐加深。YU 等<sup>[14]</sup>研究表明,油菜籽会因蒸汽爆破产生的极高能量密度而破裂。蒸汽爆破技术可使油菜籽结构变得疏松多孔,增加孔隙的连通性,改善溶质的传质途径,有利于萃取溶剂的可触及性,高孔隙率会提高渗透率,降低机械强度,这有利于蒸汽的有效穿透,在萃取过程中多酚等活性成分更容易在蒸汽爆破过程中被溶出<sup>[8]</sup>。另外,适当的蒸汽爆破处理可水解样品中半纤维素或纤维素中的糖苷键和木质素中的  $\beta$ -O—4 醚键,还可有效地水解酚类物质、木质素和碳水化合物之间的酯键和醚键,从而提高酚类物质的释放率<sup>[15]</sup>。油菜籽的变暗可能与高温引起的羟基化合物(如还原糖)和氨基酸类化合物(如蛋白质、氨基酸)产生美拉德反应有关,也可能与木质素在颗粒表面的迁移有关<sup>[16]</sup>。

本研究中,采用蒸汽爆破预处理后油菜籽中转化生成大量的 canolol,压榨分离得到的菜籽饼和菜籽油中含有大量的 canolol,且维压 1 min 时,随着爆破压力的增加,canolol 的转化量也明显增加;维压 3 min 时,爆破压力 0.7 MPa 下,菜籽饼和油中 canolol 的含量达到最大,再增加爆破压力,canolol 含量又有所降低。油菜籽经过烘烤、微波等热处理,也可提高细胞壁的渗透性,在压榨时能促进菜籽中多酚类活性成分的释放,增加籽和油中多酚含量,特别是 canolol 的含量大幅提升<sup>[17-18]</sup>。但过高的温度( $>170\text{ }^{\circ}\text{C}$ )会导致其含量降低<sup>[19]</sup>,canolol 具有热不稳定性可发生热解,还可能与蛋白生成复合物<sup>[20]</sup>。本研究结果也证实,维压 3 min 时,当压力从 0.7 MPa 上升为 1.0 MPa( $179.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),canolol 的含量显著降低。

适宜的蒸汽爆破预处理有助于提高多酚的得率。张善英<sup>[21]</sup>研究表明,油茶籽经 1.6 MPa、60 s 蒸汽爆破处理后较未处理组多酚质量浓度显著提高了 279.20%。蒸汽膨胀过程造成的瞬时高能环境也加速了脂肪积累过程,并促进了一些脂溶性成分的溶解,这也会导致多酚含量的增加<sup>[22]</sup>。蒸汽爆破也可使麦麸中游离酚酸的含量增加 50% 以上<sup>[23]</sup>,还能明显提升大麦中总可溶性酚和总抗氧化物的含量<sup>[24]</sup>,相似的效果也在大豆种皮<sup>[25]</sup>、荞麦麸皮<sup>[5]</sup>等原料中得到证实。本研究结果也证实,蒸汽爆破增加菜籽多酚的释放量,特别是对菜籽油中多酚的含量增加更加明显。

植物多酚的一个重要功效是具有很强的抗氧化活性,蒸汽爆破对菜籽饼及油中多酚的组成及含量具有明显的影响,相应的抗氧化活性也会产生变化。本研究中,通过 DPPH、FRAP 和 ABTS 试验证实,蒸汽爆破显著增加了菜籽油提取物的抗氧化活性,且多酚得率与抗氧化活性之间的相关性显著。在 0.5~2.5 MPa 压力下对大豆皮爆破处理 30~150 s,其酚类提取物的抗氧化活性明显提升,对 DPPH、ABTS 的自由基清除能力明显增加<sup>[25]</sup>。GONG 等<sup>[3]</sup>报道,大麦麸中总抗氧化能力随蒸汽爆破强度的增加而增加,与总可溶性酚含量呈高度正相关,表明蒸汽爆破后大麦麸皮提取物总抗氧化能力的增加至少部分是由于可溶性酚含量的增加所致。刘琴等<sup>[26]</sup>研究表明,总酚含量与 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 值显著相关, $r$  分别为 0.997 和 0.965。CHEN 等<sup>[25]</sup>研究也表明,大豆种皮总酚含量与 DPPH 值( $r=0.883$ )和 ABTS 值( $r=0.946$ )呈极显著正相关。

可见,蒸汽爆破可作为在制备菜籽油过程中油菜籽的加热预处理技术,能有效提高油菜籽多酚得率及抗氧化活性,且蒸汽压力为 0.7 MPa、维压 3 min(SE4)可作为一个较优的汽爆条件用于对油菜籽的加工处理。

### 参考文献:

- [1] NACZK M, AMAROWICZ R, SULLIVAN A, et al. Current research developments on polyphenolics of rapeseed/canola: a review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 489–502.
- [2] LIU Q, WU L, PU H M, et al. Profile and distribution



- of soluble and insoluble phenolics in Chinese rapeseed (*Brassica napus*)[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 616–622.
- [3] GONG L X, HUANG L L, ZHANG Y. Effect of steam explosion treatment on barley bran phenolic compounds and antioxidant capacity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(29): 7177–7184.
- [4] QIN L Z, CHEN H Z. Enhancement of flavonoids extraction from fig leaf using steam explosion[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 69: 1–6.
- [5] LI W Z, ZHANG X L, HE X Q, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the composition and biological activities of tartary buckwheat bran phenolics[J]. Food & Function, 2020, 11(5): 4648–4658.
- [6] DORADO C, CAMERON R G, MANTHEY J A. Study of static steam explosion of *Citrus sinensis* juice processing waste for the isolation of sugars, pectic hydrocolloids, flavonoids, and peel oil[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(8): 1293–1303.
- [7] HU L, GUO J M, ZHU X W, et al. Effect of steam explosion on nutritional composition and antioxidative activities of okra seed and its application in gluten-free cookies[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4409–4421.
- [8] CHENG A W, HOU C Y, SUN J Y, et al. Effect of steam explosion on phenolic compounds and antioxidant capacity in adzuki beans[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12): 4495–4503.
- [9] CARA C, RUIZ E, BALLESTEROS I, et al. Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(2): 423–429.
- [10] 王未君, 李文林, 刘昌盛, 等. 干法炒籽对油菜籽多酚和菜籽油品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 98–103.
- [11] SLINKARD K, SINGLETON V L. Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1977, 28(1): 49–55.
- [12] LANG H H, YANG R N, DOU X J, et al. Simultaneous determination of 19 phenolic compounds in oilseeds using magnetic solid phase extraction and LC-MS/MS[J]. LWT: Food Science and Technology, 2019, 107: 221–227.
- [13] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6/7): 669–675.
- [14] YU G W, GUO T T, HUANG Q D, et al. Preparation of high-quality concentrated fragrance flaxseed oil by steam explosion pretreatment technology[J]. Food Sciences & Nutrition, 2020, 8(4): 2112–2123.
- [15] KUROSUMI A, SASAKI C, KUMADA K, et al. Novel extraction method of antioxidant compounds from *Sasa palmata*(Bean) Nakai using steam explosion[J]. Process Biochemistry, 2007, 42(10): 1449–1453.
- [16] HORI Y, SATO S, HATAI A. Antibacterial activity of plant extracts from azuki beans(*Vigna angularis*) in vitro[J]. Phytotherapy Research, 2006, 20(2): 162–164.
- [17] 张苗, 杨湄, 郑畅, 等. 微波预处理时间对油菜籽及产品芥子酸衍生物的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(6): 881–888.
- [18] REKAS A, ŚCIBISZ I, SIGER A, et al. The effect of microwave pretreatment of seeds on the stability and degradation kinetics of phenolic compounds in rapeseed oil during long-term storage[J]. Food Chemistry, 2017, 222: 43–52.
- [19] CONG Y X, ZHENG M M, HUANG F H, et al. Sinapic acid derivatives in microwave-pretreated rapeseeds and minor components in oils[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 87: 103394.
- [20] SPIELMEYER A, WAGNER A, JAHREIS G. Influence of thermal treatment of rapeseed on the canolol content[J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 944–948.
- [21] 张善英. 蒸汽爆破预处理对油茶籽油和油茶籽粕蛋白质影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- [22] PRIMO-MARTÍN C, VAN DEVENTER H. Deep-fat fried battered snacks prepared using super heated steam (SHS): Crispness and low oil content[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 442–448.
- [23] LIU C, ZHANG R T, LIU B G, et al. Effect of steam explosion treatment on phenolic acid composition of wheat bran and its antioxidant capacity[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 308–314.
- [24] MRABETA, RODRÍGUEZ-GUTIÉRREZ G, GUILLÉN-BEJARANO R, et al. Valorization of Tunisian secondary date varieties(*Phoenix dactylifera* L.) by hydrothermal treatments: new fiber concentrates with antioxidant properties[J]. LWT: Food Science and Technology, 2015, 60(1): 518–524.
- [25] CHEN Y S, SHAN S R, CAO D M, et al. Steam flash explosion pretreatment enhances soybean seed coat phenolic profiles and antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126552.
- [26] 刘琴, 吴梨, 石嘉怿, 等. 油菜籽多酚的分布及加工过程对菜籽多酚含量的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 33–37.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳 正