

夏智慧, 崔文玉, 丰程凤, 等. 蒸汽爆破对从植物中提取的多酚含量及抗氧化活性影响的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1352-1360.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.034

蒸汽爆破对从植物中提取的多酚含量及抗氧化活性影响的研究进展

夏智慧, 崔文玉, 丰程凤, 罗凯云, 程安玮

(湖南农业大学食品科学技术学院/湖南省菜籽油营养健康与深度开发工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 蒸汽爆破是一种新兴的原料预处理技术, 通过高温高压和蒸汽瞬间释压作用于生物基质, 可实现物料在组分水平、组织水平和细胞水平上的分级分离。本文简要介绍了蒸汽爆破过程中原料所发生的主要的物理、化学变化, 阐述了蒸汽爆破技术对粮油、果蔬和其他原料中提取的植物多酚含量以及体外和细胞内抗氧化活性的影响, 并对蒸汽爆破的研究前景进行了展望, 以期进一步拓展该技术在食品加工行业的应用范围。

关键词: 蒸汽爆破; 植物多酚; 抗氧化活性

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)05-1352-09

Research progress on the effects of steam explosion on the content and antioxidant activity of polyphenols extracted from plants

XIA Zhi-hui, CUI Wen-yu, FENG Cheng-feng, LUO Kai-yun, CHENG An-wei

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University/Hunan Rapeseed Oil Nutrition, Health and Deep Development Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China)

Abstract: Steam explosion, as a new technology of material pretreatment, can achieve the separation of bioactivity compounds at the component, tissue and cell levels by the instantaneous pressure relief on biomass under the dual action of high temperature and pressure. This paper briefly introduced the main physico-chemical changes of raw materials in the process of steam explosion, expounded the effects of steam explosion on the content of plant polyphenols in grain, oil, fruit and vegetable and other raw materials and their antioxidant activity *in vitro* and in cells, and prospected the research of steam explosion, in order to further expand the application scope of steam explosion in food processing industry.

Key words: steam explosion; plant polyphenols; antioxidant activity

植物多酚是植物体中分子结构具有多个羟基的次生代谢物, 被称为第七大营养素, 多酚的结构和结合方式复杂, 种类繁多, 主要包括酚类、羟基苯甲酸和肉桂酸衍生物、类黄酮、花青素、香豆素和单宁

等^[1]。植物多酚具有抗氧化、清除自由基、抗癌、抑菌、抗病毒等功效。

蒸汽爆破技术可通过高温高压和瞬间释压过程来实现对质地坚硬的原料中组分的分离和结构的改变, 具有类酸性水解、热降解、类机械断裂、氢键破坏以及结构重排等多种作用, 是一项新近发展起来的农产品原料预处理技术, 其过程示意图见图1。该技术因具有无污染、缩短原料预处理时间、提高活性物质的提取率, 降低能量消耗和加工成本, 适应工业化等优点, 逐渐成为从植物性原料中提取生物活性物质提

收稿日期: 2021-03-18

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: 夏智慧(1998-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为农产品精深加工。(E-mail) 2679167191@qq.com

通讯作者: 程安玮, (E-mail) anweich@126.com

高综合附加值的重要手段之一^[2-3]。本文全面阐述了蒸汽爆破处理对原料中提取的植物多酚含量以及抗

氧化活性等方面的影响,为蒸汽爆破加工适用于不同种类物质活性成分的提取及应用提供理论指导。

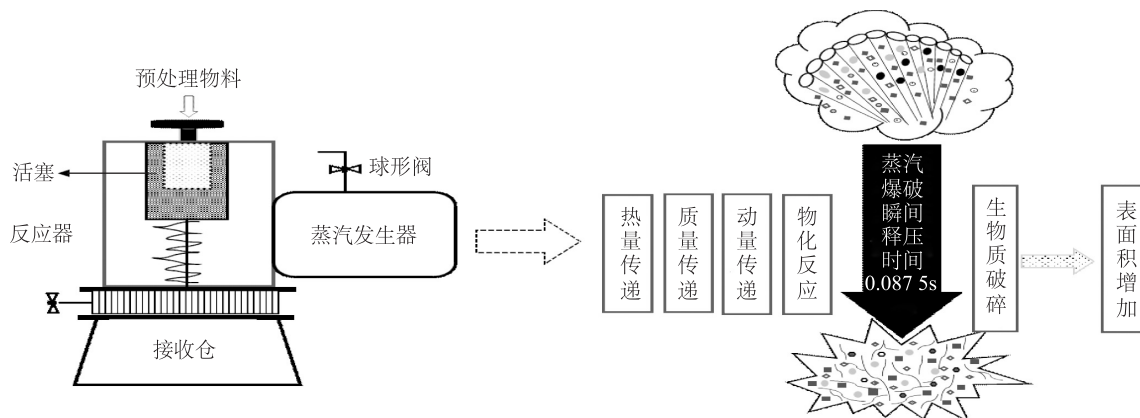


图1 蒸汽爆破过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of steam explosion processing

1 蒸汽爆破过程中主要的物理化学变化

蒸汽爆破主要通过热蒸汽被迅速汽化,使得原料细胞瞬间受到较大的压力差,细胞内部压力过大,体积急剧膨胀,远超细胞承受范围,发生类机械断裂,进一步促进氢键、无定形区和部分结晶的分解,并进行结构重组^[4-5]。Li 等^[6]和 Kobayashi 等^[7]分别用蒸汽爆破处理甘薯淀粉、马铃薯淀粉,发现其可以降低分子链聚合度,导致淀粉降解。另有研究结果表明蒸汽爆破能引起果胶分子数减少和分子质量的降低^[8]。蒸汽爆破处理富含纤维的苦荞麦麸皮后可使其纤维素、半纤维素部分降解,木质素发生一定程度水解,分子键断裂,颗粒变小,水不溶性膳食纤维中长链膳食纤维含量减少,短链膳食纤维增多^[5]。这与蒸汽爆破处理橡子壳^[9]、菠萝皮渣^[10]、小麦秸秆^[11]和麻黄草^[12]的研究结果相类似。进一步研究发现,蒸汽爆破也可使木质素和半纤维素部分降解为低分子酚类物质和水溶性糖,而蒸汽爆破处理压力过高时间过长时,又会使酚类物质发生降解或聚合。蒸汽爆破过程中也可发生糊化和美拉德反应,蛋白质与糖类发生共价结合,且美拉德反应的程度与蒸汽爆破强度有关^[13],对籽粒苋籽实蒸汽爆破处理也有相似的结论^[14]。

从微观结构来看,蒸汽爆破会破坏物质结构,使其由光滑致密变为皱褶疏松^[15]。蒸汽爆破处理西番莲后,其果皮出现了一定程度的皱褶,表面还产生大量的小坑洞,增加了表面积^[16]。麦胚经蒸汽爆破处理后多糖的片状结构出现破碎,有多处气孔和少量的丝状分支^[17]。蒸汽爆破处理后牦牛股骨表面由光滑

变得疏松、多孔,股骨头结构明显遭到破坏^[18],也可使羽毛呈现海绵状,出现许多裂缝和孔洞^[19]。这些微观结构的变化,一定程度上有利于萃取溶剂的渗透和可触及性,提高活性物质的析出和溶解。

2 蒸汽爆破对植物多酚的影响

2.1 蒸汽爆破对粮油原料中提取的植物多酚含量的影响

粮油原料中酚类物质含量丰富,种类繁多,根据结构不同分为酚酸、类黄酮、原花青素等;根据其结合方式的不同,分为游离酚和结合酚,其中结合酚又分为蛋白结合态多酚、糖苷键结合态多酚、酯键结合态多酚等^[20]。谷物麸皮中大部分酚类物质以结合态形式与细胞壁结合,常规溶剂萃取提取率较低,利用蒸汽爆破处理可以有效破坏麸皮结构,水解醚键和酯键,促进多酚释放^[21-22]。小麦麸皮在 2.5 MPa、30 s 爆破条件下,游离酚酸中香草酸的含量提高了 50% 左右,香豆酸和阿魏酸含量均达到最大,分别为对照的 36 倍和 11 倍^[23];结合态糖醛酸、香豆酸、阿魏酸的含量也在此时达到峰值,其中阿魏酸含量最高,比对照高出近 25 倍,总酚含量为 28 mg/g,比未处理组提高近 9 倍^[23]。Li 等^[24]和 Gong 等^[25]用蒸汽爆破处理谷物麸皮也得到了相似结论。用高于 7.4×10^5 Pa 的蒸汽爆破压力处理鹰嘴豆时,会导致细胞膜和细胞壁的损伤,从而有利于结合酚从细胞壁上游离出来,补偿了游离酚在该过程中热降解的损失^[26]。Chen 等^[27]发现蒸汽爆破处理也可提高大豆种皮中提取的酚类物质含量。此外,豆渣中提取的大豆异黄酮含量也会随

着蒸汽爆破强度增加呈上升趋势,在 2.0 MPa 下 30 s 时达到最大值^[28]。由于原料基质的物理结构及性质差异,以及不同的试验目的,选用的爆破条件也会不同,对有效成分的影响趋势也会不同。

适当强度的蒸汽爆破处理可提高原料中多酚类物质的提取率,但强度过高的处理条件会产生相反的效果。麸皮在过高的蒸汽爆破强度(如 2.5 MPa、90 s)条件下生物质会降解形成有机酸(如甲酸、乙酸和丙酸),酚类物质很容易发生降解或聚合反应,反而会降低酚类物质的含量^[5]。籽粒苋籽实经 0.6 MPa、60 s 蒸汽爆破处理后,提取的总酚含量可高达

7.798 mg/g,是对照的 5.3 倍,如果继续增大压力或延长爆破时间,总酚含量开始下降,时间为 120 s 时其总酚含量反而低于对照^[14]。压力 0.25~0.75 MPa 蒸汽爆破处理红豆 30~90 s,其酚类物质的得率提高,但当压力达到 1.0 MPa 时,随着时间的延长会导致酚类物质不同程度的降解或聚合,甚至引起原料的碳化^[29]。易军鹏等^[30]也发现高强度的蒸汽爆破处理会引起紫甘薯花色苷的分解。此外,Chen 等^[31]、Liu 等^[32]、唐宇等^[33]和赵鹏成等^[34]的研究结果证明,蒸汽爆破会对粮油原料中提取的酚类物质含量产生类似的影响。有关的研究结果见表 1。

表 1 蒸汽爆破对从粮油原料中提取的植物多酚含量的影响

Table 1 Effects of steam explosion on the content of plant polyphenols extracted from grain and oil raw materials

原料	处理条件	主要结果	参考文献
小麦麸皮	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、30 s、90 s	提取的游离态香草酸的含量提高 50%,香豆酸和阿魏酸含量增加 36 倍和 11 倍;结合态酚类物质含量显著增加,阿魏酸含量提高 25 倍,总酚含量提高 9 倍	[23]
小麦麸皮	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、30 s、90 s	提取的可溶性酚和共轭阿魏酸含量分别提高 2 倍和 7 倍,而 2.5 MPa、90 s 爆破麦麸所提取的酚类物质与 2.5 MPa、30 s 爆破麦麸相比,含量有所下降	[31]
小麦麸皮	185 °C、205 °C、215 °C、225 °C 时,60 s;215 °C 时,30 s、60 s、90 s、120 s	增加结合酚酸的释放量,可溶性游离和共轭酚酸的得率分别提高 39 倍和 7 倍	[32]
小麦麸皮	100 °C 煮 20.00 min;120 °C 高压灭菌 20.00 min;蒸汽爆破 200 °C、0.75 min、1.50 min、2.50 min;蒸汽爆破 180 °C、5.00 min 和 165 °C、2.90 min	酚类溶解度比煮制和高压灭菌增加 2 倍,可能是蒸汽爆破破坏了麸皮基质,更多的细胞壁成分暴露。	[35]
小麦麸皮	0.3 MPa、0.5 MPa、0.8 MPa、5 min;121 °C、20 min 热处理	提取的总黄酮、酚类物质含量比热处理提高了 198%、83%	[36]
苦荞麸皮	1.5 MPa、60 s	提高多酚的释放量,模拟胃消化 2 h 和 4 h 后蒸汽爆破组多酚的释放量分别提高 2.5 倍和 3.2 倍	[33]
苦荞麸皮	1.5 MPa、60 s	增加酚类物质的溶出,提取的结合酚含量增加近 1 倍	[24]
青稞麸皮	210~250 °C、30 s;220 °C、10~120 s	增加蒸汽爆破的温度和时间会提高提取的酚类含量,总可溶性酚酸含量提高 9.83 倍,但 250 °C、30 s 时提取的酚类含量反而有所下降	[25]
鹰嘴豆	0.45~0.95 MPa、6.6~23.4 s	细胞膜及细胞壁受损,有利于酚类物质的释放	[26]
大豆皮	0.5~2.5 MPa、30~150 s	随着压力的增大和时间的延长,提取的总多酚和总黄酮含量增加,分别在 1.5 MPa、150 s 和 2.0 MPa、90 s 时达到最高,继续增大处理条件提取的总多酚和总黄酮含量反而降低	[27]
豆渣	0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、30 s、60 s、120 s	提取的大豆异黄酮含量呈上升趋势,其中黄豆苷增加 17.75 倍	[28]
籽粒苋籽实	0.3 MPa、0.6 MPa、0.9 MPa、1.2 MPa、1.5 MPa、10 s、20 s、30 s、60 s、120 s	0.6 MPa、60 s 时提取的总酚含量增加 5.3 倍,而 1.5 MPa、120 s 时提取的总酚含量低于未处理组	[14]
红豆	0.25~1.0 MPa、30 s、90 s	增加多酚类物质的释放,提取的总多酚含量最高可达 6.68 g/kg,但在 1.0 MPa 处理条件下提取的多酚含量反而有所下降	[29]
紫甘薯	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、45 s	0.5 MPa、45 s 时提取的花色苷含量最多,更高强度的处理花色苷反而会分解	[30]
花生壳	0.4~2.0 MPa、15~75 s	最佳蒸汽爆破条件为 1.25 MPa、46 s,木犀草素提取率可提高 2 倍,进一步提高处理条件木犀草素提取率反而会下降	[34]
亚麻籽饼粕	1.0 MPa、2.0 MPa、30 s、60 s	提取的亚麻木酚素含量提高 1.73 倍	[37]
亚麻籽	0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa	提取的多酚和类黄酮含量明显高于焙烤和微波处理,并随蒸汽爆破压力的增大而增加	[38]
茶油籽	0.8~2.3 MPa、30 s	提取的籽油多酚质量浓度为对照组的 279.20%,	[39]
牡丹籽粕	0.8 MPa(170.4 °C)、5 min	提取的总多酚含量略有增加	[40]
油菜籽	220 °C 左右、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa	提取的多酚含量提高 52.63 倍,1.2 MPa 时由于热降解作用以及与蛋白质的结合作用,提取的多酚含量反而下降	[41]

2.2 蒸汽爆破对果蔬原料中提取的植物多酚含量的影响

果蔬原料中也含有丰富的酚类物质,主要为酚酸、花色苷、类黄酮等,蒸汽爆破处理能使果蔬原料完整结构受到破坏,传质阻力变小,有利于多酚类物质的提取。表2列出了蒸汽爆破对从不同果蔬原料中提取的多酚含量的影响。Hu等^[42]发现用蒸汽爆破处理秋葵籽虽然会引起黄酮类物质的损失,但中

高压蒸汽爆破使总酚释放量由 2.95 mg/g 增加到 6.19 mg/g,有利于总酚类物质的释放和产生。蒸汽爆破处理柑橘^[43-44]、柑桔果渣^[45]、大蒜^[2]、大蒜皮^[46]、西番莲^[16]、漆树果实^[47]、突尼斯红枣^[48]、甘蔗渣^[49]、菠萝皮渣^[10]和盐肤木果实^[50]也均得到相似结论,适度的蒸汽爆破有助于果蔬中提取的多酚物质含量的增加。有关的研究结果见表2。

表2 蒸汽爆破对从果蔬原料中提取的植物多酚含量的影响

Table 2 Effects of steam explosion on the content of plant polyphenols extracted from raw materials of fruits and vegetables

原料	处理条件	主要结果	参考文献
秋葵籽	1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa, 5 min	中高压蒸汽爆破条件有利于酚类物质的释放	[42]
柑橘	150 ℃, 1~3 min	与单独水提法相比,蒸汽爆破可以增加黄酮类物质溶出	[43,44]
柑桔果渣	130 ℃、150 ℃、170 ℃, 1~8 min	黄烷酮甘氨酸柚皮苷-4'-葡萄糖苷、橙皮苷葡萄糖苷和柚皮苷的回收率提高到80%以上	[45]
大蒜	1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa、3.0 MPa、4.5 MPa, 1 min、2 min、3 min、5 min、10 min	提取的酚类物质的含量随着蒸汽爆破压力的增大和时间的延长先增加后减少,在3.0 MPa、5 min时可达93.7 mg/g	[2]
大蒜皮	200 ℃、213 ℃, 5 min; 121 ℃ 加热 10 min 高压蒸汽灭菌	蒸汽爆破与高压蒸汽联合研磨相比,更易于提高提取的酚类物质的含量	[46]
漆树果实	190 ℃、200 ℃, 3 min、5 min	提取的黄酮类物质含量提高8倍,气压越大越有利于黄酮类物质提取	[47]
西番莲	0.3~1.2 MPa, 60~210 s	蒸汽爆破法提取的总酚含量比酸提法高1.19倍	[16]
非商品突尼斯红枣	180 ℃、200 ℃, 5 min	随蒸汽爆破处理强度的增加提取的酚含量不断增加	[48]
甘蔗渣	205 ℃, 10 min; 在碱性或酸性条件下, 195 ℃ 湿式氧化 15 min	湿法氧化处理甘蔗渣比蒸汽爆破处理所得酚类物质产率高;	[49]
菠萝皮渣	超微粉碎 10 min; 1.5 MPa 蒸汽爆破 30 s; 150 r/min, 水分 40%, 140 ℃ 挤压膨化	总酚和黄酮提取率分别可达(8.28±0.12) mg/g 和 (6.40±0.28) mg/g	[10]
盐肤木果实	200 ℃, 5 min	黄酮提取率增加,提取时间缩短为原来的 1/12	[50]

2.3 蒸汽爆破对其他原料中提取的植物多酚含量的影响

表3列出了蒸汽爆破对其他原料中提取的多酚含量的影响。松针经 1.5 MPa 蒸汽爆破 60 s 后,提取的黄酮类物质含量达到 50.8 mg/g,是对照的 2.54 倍,而且在较高的处理条件下(1.5~2.0 MPa, 60 s),松针中的类黄酮类物质的含量也不会显著下降,具有一定的稳定性^[51]。但茶渣^[52]和橡木^[53]中提取的酚类物质的含量随着蒸汽爆破处理强度的不断增大,呈现先增多后减少的趋势。无花果叶^[54]、粉葛^[55]和银杏叶^[56]蒸汽爆破处理后总黄酮得率变化也与此一致。提取的酚类物质含量下降可能是由于一部分黄酮发生降解,且细胞内部溶出的黄酮又重新聚合形成不溶性物质所引起的^[51]。橄榄树枝叶^[57-58]、杜仲叶^[59]、虎杖^[60]、*Sasa palmata* (bean) nakai 叶片^[61]和亮叶杨桐叶片^[62]等原料也证明蒸汽爆破是提高多酚类物质释放量的有效处理方法。

蒸汽爆破使物质中多酚得率提高的原因主要有两方面,一方面是蒸汽爆破过程中产生了新的多酚,在高温高压的酸性环境下,纤维素、半纤维素和木质素发生热降解产生酚酸和挥发酚类,如愈创木酚、丁香酚、酚醛(香草醛和丁香醛)和酮类(香草酮和丁香酮)等^[63-65];另一方面是促进了多酚的释放,蒸汽爆破后物质结构变得更为疏松多孔,增大了提取液与物料的接触面积,使酚类物质溶出率提高;或是蒸汽爆破过程中水解了细胞壁物质(多酚、多糖、木质素等)之间的酯键和/或醚键,使结合态多酚向游离态多酚转化,提高了多酚的溶出率^[20,47]。

3 蒸汽爆破对提取的植物多酚抗氧化活性的影响

3.1 蒸汽爆破对提取的植物多酚体外抗氧化活性的影响

植物多酚体外抗氧化活性的强弱多采用

DPPH · (1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)、ABTS⁺ (2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 自由基清除率以及 FRAP (铁离子还原能力) 等检测指标来表示。表 4 列出了蒸汽爆破处理对植物多酚体外抗氧化活性的影响。Noda 等^[46] 用蒸汽爆破处理大蒜皮,测得 DPPH · 清除活性的 EC_{50} 值随着压强的增加和时间的延长而急剧下降,在压强 3.0 MPa 以上达到恒定值,而且抗氧化活性高于黑大蒜。原因可能是,一方面蒸汽爆破促进了细胞内结合酚的释放,另一方面是木质素和半纤维素部分降解为低分子酚类物质和水溶性糖(如 5-羟甲基糠醛),进而提高了提取物的抗氧化活性。Chen 等^[31]、Liu 等^[32] 和 Gong 等^[22] 也发现蒸汽爆破处理后谷物麸皮提取物的抗氧化活

性得到有效提高。此外,Sui 等^[52] 的研究结果表明,蒸汽爆破可提升茶渣提取物的抗氧化能力,FRAP、羟自由基清除活性、超氧化物生成的最高抑制率最大,分别可达到对照(维生素 C)的 95.2%、76.6%、88.0%,DPPH · 清除能力基本达到维生素 C 的水平,比相同剂量的未处理组高 20.0%。类似的,蒸汽爆破处理籽粒苋籽实^[14]、紫甘薯^[30]、秋葵籽^[42]、粉葛^[55]、*Sasa palmata* (bean) nakai 的叶片^[61] 和竹茎^[66] 后,其酚类物质的含量都有所提高,进而提高了提取物的抗氧化活性。漆树果实经蒸汽爆破处理后所含的主要黄酮类物质槲皮苷(槲皮素-3-O-鼠李糖苷)去除糖基变为活性更高的槲皮素,抗氧化活性得到提高^[47]。

表 3 蒸汽爆破对其他原料中提取的植物多酚含量的影响

Table 3 Effects of steam explosion on the content of plant polyphenols extracted from other raw materials

原料	处理条件	主要结果	参考文献
松针	0.5~2.0 MPa, 20~120 s	提取的类黄酮物质提高 2.54 倍,具有良好的稳定性	[51]
茶渣	0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa, 3 min	提取的多酚含量先不断上升,在 0.6 MPa、3 min 的处理条件下可增加 15.5%,之后又略有下降	[52]
橡木材	160~240 °C, 5~15 min; 乙醇提取	提取的总酚含量随蒸汽爆破处理时间的增加而增加,220 °C、15 min 时可达 50.5 mg/g,但温度过高,240 °C、15 min 时提取的总酚含量反而有所下降	[53]
无花果叶	0.2 MPa、0.4 MPa, 3 min	0.2 MPa、3 min 时黄酮得率提高 55.9%,而 0.4 MPa、3 min 时黄酮得率反而有所降低	[54]
粉葛	1.0~2.0 MPa, 30 s、40 s、60 s、80 s	1.0 MPa 下总黄酮提取量随蒸汽爆破时间的延长而增加,可提高 2.32 倍,但 2.0 MPa 下随处理时间的延长总黄酮提取量先增加后降低	[55]
银杏叶	0.3~0.5 MPa, 3~5 min	与传统有机溶剂提取法相比,黄酮类物质提取率提高 2.1 倍,但蒸汽爆破处理压力过高时间过长时则下降	[56]
修剪的橄榄树细枝和叶	200 °C、210 °C、220 °C、240 °C, 5 min	提取的酚类物质的含量随蒸汽爆破温度增加而增加,最高可达 1.9%	[57]
杜仲叶	加适量的空气,压力分别达到 0 MPa、0.15 MPa、0.40 MPa 和 0.55 MPa 时,再加饱和蒸汽,作用压力分别达到 0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa 和 1.2 MPa 后,保持一段时间进行低温蒸汽爆破	绿原酸得率达到 2.82%,比对照高 62.0%,萃取的时间由 120 min 缩短到 15 min	[59]
虎杖	0.8~1.6 MPa 蒸汽爆破 1~6 min,用绿色木霉固态发酵	白藜芦醇苷转化为白藜芦醇,极大地提高了虎杖白藜芦醇的提取率	[60]
<i>Sasa palmata</i> (bean) nakai 叶片	180~260 °C, 0.5~20.0 min	提取的酚类物质含量在 250 °C、1 min 时可达 217.41 mg/g,但更高强度的处理条件下反而会降低	[61]
亮叶杨桐叶片	0.5 MPa、1.5 MPa、3.0 MPa, 30 s、60 s、120 s	随着蒸汽爆破压力和时间的增加,提取的芹菜素含量不断增加,0.5 MPa、2 min 时达到最大值(9%左右),而后再增大蒸汽爆破处理强度提取的黄酮类物质含量反而会有所减少	[62]

适宜的爆破条件可以提高提取的酚类物质的抗氧化活性,但在高强度的蒸汽爆破条件下,物质的抗氧化活性反而会降低。当蒸汽爆破处理压力过高时间过长时,阿魏酸和对香豆酸会发生脱羧基反应,通过自由基中间体进一步聚合成二聚体,阿魏酸也会

发生降解,生成甲基、乙基、乙烯基愈创木酸和香兰素等小分子物质,降低物料的氧化能力^[23,67]。蒸汽爆破条件为 1.5 MPa、90 s 时麦麸提取物清除 DPPH 自由基能力与铁离子还原能力达到最高,继续增加压力和延长处理时间,抗氧化能力反而呈下降趋势,这表

明过高强度的蒸汽爆破处理不利于麦麸抗氧化成分的释放,也可能造成抗氧化成分的损失^[68]。用蒸汽爆破处理籽粒苋籽实^[14]、紫甘薯^[57]和茶渣^[52]后也得出相似结论,即过高的蒸汽爆破处理强度可能会降低提取的酚类物质的抗氧化活性。蒸汽爆破处理后多酚的抗氧化活性与其含量之间具有明显的相关性。红豆经爆破处理后,多酚浓度与 DPPH·、ABTS⁺清除能力和 FRAP 相关系数分别为 0.784、

0.937 和 0.90^[29]。秋葵籽经蒸汽爆破后其提取物的 FRAP、DPPH·、O₂⁻ (超氧自由基)清除能力与总类黄酮含量呈负相关,相关系数分别为 -0.893、-0.960、-0.132,但与总多酚含量呈正相关,相关系数分别为 0.685、0.468、0.951,有可能是蒸汽爆破过程中产生的一些非酚类物质例如还原性糖也具有抗氧化活性^[42]。

表 4 蒸汽爆破对提取的植物多酚体外抗氧化活性的影响
Table 4 Effects of steam explosion on antioxidant activity of polyphenols *in vitro*

原料	处理条件	主要结果	参考文献
大蒜皮	200 ℃、213 ℃、5 min	DPPH· 的 EC ₅₀ (半数效应浓度)值随蒸汽爆破压强和时间的增加而下降,大蒜皮抗氧化活性高于黑蒜	[46]
小麦麸皮	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、30 s、90 s	提取物自由基清除活性明显增强,DPPH· 和 ABTS ⁺ 清除能力分别提高 2.75 倍和 4.60 倍	[31]
小麦麸皮	185 ℃、205 ℃、215 ℃、225 ℃、60 s;215 ℃、30 s、60 s、90 s 和 120 s	总游离酚酸、碱水解共轭酚酸、酸水解共轭酚酸、DPPH· 的清除能力、ABTS ⁺ 、Trolox 的清除能力分别增加了 11.0 倍、5.8 倍、2.6 倍、23.1 倍、17.1 倍和 2.4 倍	[32]
小麦麸皮	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、30 s、90 s	提取物 ABTS ⁺ 清除能力增加了近 5.3 倍	[23]
苦荞麦麸皮	1.5 MPa、60 s	提取物中结合酚类物质的 O ₂ ⁻ 清除能力提高 270%	[24]
青稞麸皮	210~250 ℃、30 s;220 ℃、10~120 s;甲醇萃取	铁离子还原能力增加 1.8 倍	[22]
籽粒苋籽实	0.3 MPa、0.6 MPa、0.9 MPa、1.2 MPa、1.5 MPa、10 s、20 s、30 s、60 s、120 s	0.6 MPa、60 s 时 DPPH·、ABTS ⁺ 清除率、铁离子还原能力分别提高 4.6 倍、3.8 倍、11.6 倍,但更高强度的蒸汽爆破处理下多酚类物质的抗氧化活性反而有所降低	[14]
茶渣	0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、3 min	FRAP 值可达到 V _C 的 95.2%,对 DPPH· 的清除能力基本达到 V _C 水平,OH· 清除率可达 76.6%±0.5%,对 O ₂ ⁻ 的抑制率提高 20.0%	[52]
紫甘薯	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、45 s	花色苷 DPPH· 清除能力提高约 4%,但 2.5 MPa、45 s 的蒸汽爆破处理条件下花色苷的还原力反而会有所下降	[30]
秋葵籽	1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa、5 min	提取物抗氧化能力显著提高,DPPH· 清除能力由 18.78% 提高到 67.34%,铁离子还原能力由 13.37% 提高到 149.04%	[42]
粉葛	1.0 MPa、2.0 MPa、30 s、40 s、60 s、80 s	DPPH· 的半抑制浓度由 30.65 g/L 降至 10.10 g/L	[55]
小麦麸皮	0.5 MPa、1.5 MPa、2.5 MPa、30 s、90 s	随蒸汽爆破压力和时间的不断增加,提取物 DPPH· 清除率和铁离子的还原能力不断提高,但 2.5 MPa、90 s 时提取物抗氧化活性反而有所下降	[68]

3.2 蒸汽爆破对提取的植物多酚细胞内抗氧化活性的影响

Chen 等^[31]研究发现细胞抗氧化活性在人肝癌 (HepG2) 细胞未经磷酸盐缓冲液 (PBS) 冲洗的情况下,蒸汽爆破处理和未蒸汽爆破处理的麦麸提取物的半数效应浓度值 (EC₅₀) 分别为 (5 038.70±318.87) g/ml 和 (895.78±22.12) g/ml,即蒸汽爆破处理后的提取物显示出比未蒸汽爆破处理的更高的抗氧化活性。张瑞婷^[68]也证明蒸汽爆破可提高麦麸提取物的细胞抗氧化活性,HepG2 细胞经 PBS 冲洗或未经 PBS 冲洗,2.5 MPa、30 s 处理组提取物的细胞抗氧化值均大于未处理

组,且分别是未蒸汽爆破处理组的 1.74 倍 (PBS 冲洗) 和 5.61 倍 (无 PBS 冲洗)。这主要是由于蒸汽爆破处理后提取物中可溶性酚含量较高,尤其是可溶性阿魏酸^[69-72]。苦荞麦麸皮经蒸汽爆破处理后,提取物中游离酚类物质使 HepG2 细胞的抗氧化活性提高了 215%,EC₅₀ 值比未蒸汽爆破处理组高 2 倍左右,结合酚的 EC₅₀ 值与未蒸汽爆破处理组相比也有显著性差异 (P<0.05);同时也发现蒸汽爆破处理后酚类提取物对人结肠癌 (Caco-2) 细胞增殖的抑制作用也显著提高,游离酚组分细胞增殖率由 100.00% 降至 32.59%^[24]。唐宇等^[33]在模拟胃肠消化过程中发现未经蒸汽爆破处理的

麸皮的肠消化组没有细胞抗氧化活性,而经蒸汽爆破处理的麸皮的肠消化组有细胞抗氧化活性。用蒸汽爆破处理亮叶杨桐叶片也可以显著增强提取物的细胞抗氧化活性,不管 HepG2 细胞是否用 PBS 洗涤,蒸汽爆破处理后叶片提取物的 EC_{50} 值均明显降低^[62]。

4 展望

蒸汽爆破作为一种新兴的原料预处理技术,可提高多酚类等活性物质的提取率,影响其抗氧化活性。蒸汽爆破技术主要受物料种类及成分、含水率、预浸泡、化学预处理、粉碎程度、流动性等内因和蒸汽压力(温度)、维压时间等外因影响。因此需要进一步研究:(1)通过体内和体外联合试验分析蒸汽爆破对提取的多酚含量及活性的影响及机制;(2)原料基质特点与蒸汽爆破效果之间的作用关系,通过构建模型确立最佳爆破条件,提高有效成分的提取率;(3)蒸汽爆破对原料基质中活性成分释放机制及迁移转化规律的影响;(4)蒸汽爆破对原料中各种营养成分的影响及它们之间的互作关系变化等。相信随着研究的不断深入,蒸汽爆破技术将在植物活性物质提取和抗氧化活性的提高等领域发挥越来越重要的作用,蒸汽爆破技术在食品加工业的应用范围将被进一步拓展。

参考文献:

- [1] NACZK M, SHAHIDI F. Extraction and analysis of phenolics in food [J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, 1054: 95-111.
- [2] NODA Y, ASADA C, SASAKI C, et al. Extraction method for increasing antioxidant activity of raw garlic using steam explosion [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2013, 73(15): 1-4.
- [3] MCINTOSH S, ZHANG Z Y, PALMER J, et al. Pilotscale cellulosic ethanol production using eucalyptus biomass pretreated by dilute acid and steam explosion [J]. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2016, 10(4): 346-358.
- [4] SUI W J, CHEN H Z. Extraction enhancing mechanism of steam exploded *Radix Astragali* [J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49(12): 2181-2190.
- [5] 何晓琴,李苇舟,夏晓霞,等. 蒸汽爆破预处理的苦荞麸皮不溶性膳食纤维理化特性及结构研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(18): 47-53.
- [6] LI G L, CHEN M X, LI F, et al. Effect of steam explosion pretreatment on molecular structure of sweet potato starch [J]. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2017, 16(5): 1113-1119.
- [7] KOBAYASHI F, SAWADA T, NAKAMURA Y, et al. Saccharification and alcohol fermentation in starch solution of steam-exploded potato [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1998, 69(3): 177-189.
- [8] 王树宁,陈笑言,黄澄洁,等. 蒸汽爆破技术对苹果果胶乳化特性的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(2): 56-61.
- [9] 杨静,蒋剑春,张宁,等. 蒸汽爆破预处理对橡子壳酶水解效果的影响[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(12): 2565-2569.
- [10] 姜永超,林丽静,龚霄,等. 物理改性处理对菠萝皮渣膳食纤维物化特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(5): 973-979.
- [11] 郑续,王慧梅,刘忠,等. 小麦秸秆的蒸汽爆破及其产物表征[J]. *天津科技大学学报*, 2020, 35(4): 26-30.
- [12] 陈洪章,彭小伟. 汽爆技术促进中药资源高值化利用[J]. *化学进展*, 2012, 24(9): 1857-1864.
- [13] 张燕鹏,杨瑞金,华霄,等. 凝胶电泳法研究蒸汽爆破对高温豆粕中蛋白质结构的影响[J]. *中国油脂*, 2013, 38(12): 76-79.
- [14] 方芳. 蒸汽爆破预处理对籽粒苋籽实抗氧化能力的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 21-25,30.
- [15] 孙俊良,杜寒梅,梁新红,等. 响应面法优化蒸汽爆破技术提取苹果果胶工艺[J]. *食品科学*, 2017, 38(14): 270-275.
- [16] 梁泳伦,郑丽丽,杨阳,等. 汽爆预处理提取西番莲果胶及其性质分析[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(13): 9-16.
- [17] 胡蕾,叶鹏,彭子木,等. 蒸汽爆破麦胚多糖提取工艺优化及其理化性质研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 149-155.
- [18] 秦晓洁,沈青山,张春晖,等. 瞬时弹射式蒸汽爆破法制备速溶牦牛骨粉及其理化特性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 307-315.
- [19] ZHANG Y, YANG R, ZHAO W. Improving digestibility of feather meal by steam flash explosion [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(13): 2745-2751.
- [20] 颜才植,叶发银,赵国华. 食品中多酚形态的研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 249-254.
- [21] HELENO S A, MARTINS A, QUEIROZ M J, et al. Bioactivity of phenolic acids: metabolites versus parent compounds: a review [J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 501-513.
- [22] GONG L X, ZHANG Y, WANG J, et al. Change in health ingredients of whole Tibetan hull-less barley after steam explosion and simulated digestion *in vitro* [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 40(2): 239-248.
- [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]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 6: 308-314.
- [24] LI W Z, ZHANG X L, HE X Q, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the composition and bioactive activities of Tartary buckwheat bran phenolics [J]. *Food & Function*, 2020, 11(5): 4648-4658.
- [25] 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: 7177-7184.
- [26] MRAD R, ROUPHAEL M, MAROUN R G, et al. Effect of expansion by 'Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum' (IVDV) on polyphenol content, expansion ratio, texture and color changes of Australian chickpea [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59: 874-882.
- [27] CHEN Y S, SHAN S R, CAO D M, et al. Steam flash explosion pre-

- treatment enhances soybean seed coat phenolic profiles and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2020, 319:126552.
- [28] 靳羽慧,刘长忠,徐响,等. 蒸汽爆破对豆渣中大豆异黄酮的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 16-20.
- [29] 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.
- [30] 易军鹏,杨亚皇,李欣,等. 蒸汽爆破预处理对紫甘薯花色苷抗氧化性及抑菌性的影响[J]. 农产品加工, 2019, 489(19): 25-30.
- [31] CHEN Y S, ZHANG R T, LIU C, et al. Enhancing antioxidant activity and antiproliferation of wheat bran through steam flash explosion [J]. Journal of Science and Technology, 2016, 53(7): 3028-3034.
- [32] LIU L Y, ZHAO M L, LIU X X, et al. Effect of steam explosion-assisted extraction on phenolic acid profiles and antioxidant properties of wheat bran [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(10): 3484-3491.
- [33] 唐宇,张小利,何晓琴,等. 体外模拟胃肠消化过程中蒸汽爆破处理的苦荞麸皮的抗氧化及抗增殖活性 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 103-111.
- [34] 赵鹏成. 蒸汽爆破预处理对花生壳黄酮组分的影响[D]. 洛阳:河南科技大学, 2019.
- [35] MAURA F, ANTON H, GIULIO Z, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran [J]. New Biotechnology, 2020, 56: 38-45.
- [36] KONG F, WANG L, CHEN H Z, et al. Improving storage property of wheat bran by steam explosion [J]. Food Science Technology, 2020, 56(1): 287-292.
- [37] 李冰. 亚麻籽蒸汽爆破处理及其活性成分变化研究 [D]. 洛阳:河南科技大学, 2017.
- [38] 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 Science & Nutrition, 2019, 8: 2112-2123.
- [39] 张善英,郑丽丽,艾斌凌,等. 蒸汽爆破预处理对油茶籽水代法提油品质的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(11): 124-130.
- [40] 仇菊,曹汝鸽,朱宏,等. 牡丹籽粕营养特性分析及蒸汽爆破处理的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(6): 83-86.
- [41] YU G, GUO T, HUANG Q. Preparation of rapeseed oil with super high canolol content and superior quality characteristics by steam explosion pretreatment technology [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 2271-2278.
- [42] 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.
- [43] CAMERON R G, CHAU H K, HOTCHKISS A T, et al. Release and recovery of pectic hydrocolloids and phenolics from culled citrus fruits [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 52-61.
- [44] CAMERON R G, CHAU H K, HOTCHKISS A T, et al. Recovery of pectic hydrocolloids and phenolics from huanglongbing related dropped citrus fruit [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4467-4475.
- [45] 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: 1293-1303.
- [46] NODA Y, ASADA C, SASAKI C, et al. Effects of hydrothermal methods such as steam explosion and microwave irradiation on extraction of water soluble antioxidant materials from garlic husk [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10: 3397-3402.
- [47] CHEN G Z, CHEN H Z. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion [J]. Food Chemistry, 2011, 126: 1934-1938.
- [48] MRABET A, JIMÉNEZ-ARAUJO A, JUAN F J, et al. Antioxidant phenolic extracts obtained from secondary Tunisian date varieties (*Phoenix dactylifera* L.) by hydrothermal treatments [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 917-924.
- [49] CARLOS M, HELENE B K, MARCELO M, et al. Study of the phenolic compounds formed during pretreatment of sugarcane bagasse by wet oxidation and steam explosion [J]. Holzforschung, 2007, 61(5): 483-487.
- [50] 陈洪章. 盐肤木果实汽爆处理及其油脂黄酮等联产综合利用技术 [Z]. 北京:中国科学院过程工程研究所, 2007.
- [51] SONG H D, YANG R J, ZHAO W, et al. Innovative assistant extraction of flavonoids from Pine (*Larix olgensis* Henry) needles by high-density steam flash-explosion [J]. Food Chemistry, 2014, 62: 3806-3812.
- [52] SUI W J, XIAO Y, LIU R, et al. Steam explosion modification on tea waste to enhance bioactive compounds' extractability and antioxidant capacity of extracts [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 51-59.
- [53] JUNG J Y, HA S Y, YANG J K. Response surface optimization of phenolic compounds extraction from steam exploded oak wood (*Quercus mongolica*) [J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2017, 45(6): 809-827.
- [54] 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.
- [55] 张棋,易军鹏,李欣,等. 蒸汽爆破预处理对粉葛总黄酮及抗氧化性的影响 [J]. 食品科学, 2016, 37(9): 40-44.
- [56] 张兵兵,曾国明,傅亚,等. 蒸汽爆破提取银杏叶黄酮类化合物的工艺研究 [J]. 纤维素科学与技术, 2012, 20(1): 39-44; 71.
- [57] CONDE E, CARA C, MOURE A, et al. Antioxidant activity of the phenolic compounds released by hydrothermal treatments of olive tree pruning [J]. Food Chemistry, 2009, 114: 806-812.
- [58] CASTRO E, CONDE E, MOURE A, et al. Antioxidant activity of liquors from pretreated olive tree wood [J]. Wood Science and Technology, 2008, 42: 579-592.
- [59] FU X G, CHEN H Z. Air-steam explosion enhancing the extraction efficiency of chlorogenic acid from leaves of *Eucommia ulmoides* oliver

- [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 146: 317-325.
- [60] 陈洪章, 彭小伟. 汽爆与生物法耦合将虎杖白藜芦醇苷转化成白藜芦醇的方法: CN101812483A [P]. 2010-08-25.
- [61] 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: 1449-1453.
- [62] LIU B G, CHEN Y S, MO H Z, et al. Catapult steam explosion significantly increases cellular antioxidant and anti-proliferative activities of *Adinandra nitida* leaves [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 23: 423-431.
- [63] CADAHÍA E, FERNÁNDEZ D S B, JALOCHA J. Volatile compounds in Spanish, French, and American oak woods after natural seasoning and toasting[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 5923-5932.
- [64] NATALI N, CHINNICI F, RIPONI C. Characterization of volatiles in extracts from oak chips obtained by accelerated solvent extraction (ASE) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 8190-8198.
- [65] PISARNITSKY A F, KLIMOV S A, BRAZHNIKOVA E V. Effect of acid hydrolysis of oak wood on its aroma-forming complex[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2004, 40: 613-616.
- [66] SUN S L, WEN J L, MA M G, et al. Structural features and antioxidant activities of degraded lignins from steam exploded bamboo stem [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 56: 128-136.
- [67] ARRIETA-BAEZ D, DORANTES-LVAREZ L, MAR-TINEZ-TORRES R, et al. Effect of thermal sterilization on ferulic, coumaric and cinnamic acids: dimerization and antioxidant activity [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(13): 2715-2720.
- [68] 张瑞婷. 蒸汽爆破对麦麸多酚组成及其抗氧化活性的影响[D]. 洛阳: 河南工业大学, 2016.
- [69] GHASEMI K, GHASEMI Y, EBRAHIMZADEH M A. Antioxidant activity, phenol and flavonoid contents of 13 citrus species peels and tissues[J]. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2009, 22(3): 277-281.
- [70] EBRAHIMZADEH M A, ENAYATIFARD R, KHALILI M, et al. Correlation between sun protection factor and antioxidant activity, phenol and flavonoid contents of some medicinal plants[J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR, 2014, 13(3): 1041-1047.
- [71] TAN B L, NORHAIZAN M E, YEAP S K, et al. Water extract of brewers' rice induces antiproliferation of human colorectal cancer (HT-29) cell lines via the induction of apoptosis[J]. European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 2015, 19: 1022-1029.
- [72] CHANDRASEKARA A, SHAHIDI F. Bioactivities and antiradical properties of millet grains and hulls[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59: 9563-9571.

(责任编辑:陈海霞)