

丰程凤, 崔文玉, 夏智慧, 等. 蒸汽爆破对植物多酚及抗氧化活性的影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 438–445. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020198

FENG Chengfeng, CUI Wenyu, XIA Zhihui, et al. Research Progress in the Effects of Steam Explosion on Plant Polyphenols and Antioxidant Capacity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 438–445. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020198

· 专题综述 ·

蒸汽爆破对植物多酚及抗氧化活性的影响研究进展

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 (steam explosion) 是一种典型的物理-化学预处理技术, 通过高温高压蒸汽瞬间释压破坏细胞壁结构, 促进植物活性成分的释放。适宜的蒸汽爆破预处理有助于显著提高可溶性多酚的提取率, 有效促进多酚物质的释放, 同时提高抗氧化能力。将蒸汽爆破技术引入植物及加工副产物预处理中, 可以明显提升天然活性成分提取率和功能活性。本文从蒸汽爆破技术对植物中结合酚、游离酚的含量及组成, 以及对体外抗氧化活性的影响等方面进行了概述, 以期为该技术在食品加工行业的利用提供指导。

关键词: 蒸汽爆破, 游离酚, 结合酚, 抗氧化活性

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)04-0438-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020198



本文网刊:

Research Progress in the Effects of Steam Explosion on Plant Polyphenols and Antioxidant Capacity

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

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

Abstract: Steam explosion, as a typical physical-chemical pretreatment technology, destroys the cell wall structure by instantaneous release of high-temperature and high-pressure steam, which promotes the release of plant active ingredients. Appropriate steam explosion pretreatment can significantly improve the extraction rate of free polyphenols, effectively promote the release of polyphenols, and improve the antioxidant capacity. In recent years, steam explosion was applied into the pretreatment of plants and their by-products, and it can significantly improve the extraction of natural active ingredients and enhance functional activity. The influence of steam explosion technology on the content and composition of bound polyphenols and free polyphenols in plants, and the influence on their antioxidant capacity *in vitro* are summarized in this paper. This would provide a guidance for the use of steam explosion in the food processing industry.

Key words: steam explosion; free polyphenols; bound polyphenols; antioxidant capacity

植物多酚 (plant polyphenols) 是一类存在于植物体内多羟基酚类化合物的总称, 主要包括黄酮类、单宁类、花色苷类、酚酸类等, 具有清除自由基、抗氧化、抗衰老等多种生物活性。酚类物质在植物中主

要以游离态和结合态存在, 游离酚是指不与其他大分子发生物理、化学相互作用的酚类化合物^[1]; 结合酚是经由共价键与食品基质 (如细胞壁物质) 相结合的多酚^[2], 需要通过化学或酶处理方法将多酚从细胞壁

收稿日期: 2021-02-25

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

作者简介: 丰程凤 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: chengffeng@126.com。

* 通信作者: 程安玮 (1975-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 生物活性物质与功能食品, E-mail: anweich@126.com; anweich@hunau.edu.cn。

上分离出来。

蒸汽爆破技术最早是在 1926 年由梅森发明, 主要用于木材加工业^[3]。它具有类酸性水解、热降解、类机械断裂、氢键破坏以及结构重排等多种作用, 集高温和高压的双重效果, 使植物组织的细胞破裂及结构破坏, 是一种物理化学预处理手段^[4-5]。该技术集作用时间短、耗能低、高效无污染及适应工业化等优点, 被认为是生物质资源转换最具发展前景的预处理方法^[6-10]。

近年来, 蒸汽爆破技术逐渐被应用到植物及加工副产物中生物活性成分提取预处理中, 展现出极好的效果^[4,11-13]。本文综述了近十年来国内外蒸汽爆破技术对植物多酚及抗氧化活性的影响研究, 为爆破加工适用于不同种类生物质及有效成分的提取提供理论指导, 拓展爆破加工技术在食品加工行业的利用范围。

1 蒸汽爆破对植物中多酚的影响

1.1 总多酚

酚类作为食源性植物原料中重要的活性成分, 组成种类繁多、结构复杂, 易受加工方式的影响。适宜的蒸汽爆破预处理条件能显著促进植物原料中多酚类物质的释放, 主要原理是蒸汽爆破处理破坏了原料的细胞结构, 从而有利于萃取溶剂的可触及性。过高的蒸汽爆破强度则会使多酚类物质发生降解从而导致多酚提取量降低。表 1 总结了不同植物原料在不同蒸汽爆破条件下酚类物质的变化及其作用机制。可以看出, 多酚物质变化因原料品种和处理条件不同而存在差异, 但经蒸汽爆破处理后多酚的提取率均增加。此外, 蒸汽爆破可用于柑橘皮渣^[14-15]、草莓挤压物^[16]、红白葡萄柚汁加工残留物^[17]等农产品加工副产物中黄酮类等活性物质的提取及利用。

1.2 游离酚(可溶性多酚)

蒸汽爆破技术通过高温高压作用破坏物料结构, 可将结合在细胞壁上的多酚游离出来, 显著提高了游离酚的提取率。Gong 等^[4]报道大麦麸中总可溶性酚含量均随蒸汽爆破强度的增加而增加, 在 220 °C 蒸汽爆破处理 120 s 后, 总可溶性酚产率提高了近 9 倍, 阿魏酸和对香豆酸的产量急剧增加, 其中阿魏酸的游离型和共轭型的产率分别提高了 59 和 9 倍。Liu 等^[30]也以大麦麸皮为原料得出相似的结果, 但其中可溶性游离酚酸和可溶性共轭酚酸的含量只比未处理组增加了 39 和 7 倍。同样地, 蒸汽爆破也显著提高麸皮总可溶性酚含量, 特别是游离阿魏酸和共轭阿魏酸的含量增加明显^[31]。Conde 等^[32]发现在 240 °C 蒸汽爆破条件下橄榄枝的酚类提取率比 200 °C 下约高 2 倍。爆破温度从 180 °C 升高到 250 °C, *Sasa palmata* 中的酚类物质含量呈逐渐增加的趋势, 最高可为未处理组的 52 倍, 但当温度高于 260 °C 时, 酚类物质提取率开始降低^[33]。

高效液相色谱法(High Performance Liquid

Chromatography, HPLC)测定苦荞麸皮中含有没食子酸、焦性没食子酸、原儿茶酸、羟基苯甲酸、儿茶素、咖啡酸、绿原酸、荳蔻苷、芦丁、金丝桃苷、白藜芦醇、木犀草素、槲皮素、山奈酚、阿魏酸 15 种成分, 这 15 种成分在蒸汽爆破处理前均存在于游离部位中, 蒸汽爆破后咖啡酸和阿魏酸消失。在结合酚中, 除焦性没食子酸、原儿茶酸和咖啡酸 3 种外, 其余 12 种酚类物质在蒸汽爆破处理前均检测出; 相反, 经蒸汽爆破后这 3 种成分能检测到, 而木犀草素消失^[12]。苯甲酸和咖啡酸在加热条件下可分别生成奎宁酸和儿茶酚^[34], 热处理也有助于咖啡酸和奎尼酸转化为绿原酸^[35]。Cheng 等^[36]选用 0.25~1.0 MPa 压力范围分别对红豆爆破 30 和 90 s, 结果证实 0.25~0.75 MPa 范围内随着压力的上升和时间的延长, 游离酚的含量呈上升的趋势; 压力提高到 1.0 MPa, 长时间的维压反而降低其游离酚的含量。随着爆破压力的增强和时间的延长, 游离酚中的儿茶素、儿茶素、表儿茶素和香豆酸含量明显上升, 阿魏酸含量明显下降, 芦丁和异槲皮苷的含量先增加后又降低。

Arrieta-Baez 等^[37]指出加热条件下, 阿魏酸和对香豆酸的脱羧作用可使其相应的自由基中间体形成二聚产物, 阿魏酸和对香豆酸的游离和共轭形式对蒸汽爆破更为敏感^[36]。在过度汽爆处理过程中, 阿魏酸可能会分解成 4-甲基、4-乙基和 4-乙基愈创木酚和香兰素等化学物质^[38]。适当的蒸汽爆破处理可水解半纤维素或纤维素中的糖苷键和木质素中的 β -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/或醚键, 从而提高酚类物质的释放率。蒸汽爆破预处理有助于显著提高可溶性多酚的提取率, 然而高温和长时间的汽爆处理会导致酚类物质降解或聚合, 由于芳基环取代基类型和取向存在差异性, 这使得热处理会导致酚类化合物发生不同程度的降解。

1.3 结合酚(不溶性多酚)

植物中具有不同的结合态的多酚, 许多实验表明结合态的含量远远高于游离酚, 如玉米中的结合酚含量达 87.4%~95.6%^[39], 藜麦种子中结合酚占了 80%^[40], 6 种小扁豆含有 9.94%~63.11% 的不可提取多酚^[41]。结合酚通常与植物不溶性大分子如纤维素或半纤维素共价结合^[42], 不能直接用有机溶剂萃取得到。

蒸汽爆破可通过直接破坏细胞壁基质或水解细胞壁中酚和多糖之间的酯键, 从细胞液泡中释放被束缚的酚类物质^[4,29]。红豆经蒸汽爆破(压力 0.25~1.0 MPa, 维压时间 30~90 s)预处理后, 结合酚含量呈现先增加后降低的趋势, HPLC 结果表明结合酚主要成分是原儿茶素, 而咖啡酸只存在于结合酚中^[36]。由于蒸汽爆破过程中物理和化学作用的协同作用, 酚酸的形成和降解是共存的过程, 需要达到一个平衡状态, 因此随着蒸汽爆破程度的增加, 趋势表现为先增加后减少^[29,43]。蒸汽爆破产生的类机械作用也可导

表 1 蒸汽爆破过程中酚类物质的变化及作用机制

Table 1 Changes and mechanism of phenols during steam explosion

原料	爆破条件	酚类物质的变化	作用机制	文献
大豆种皮	0.5~2.5 MPa, 30~150 s	随着爆破压力的增大和时间延长, 总多酚和总类黄酮的含量逐渐增加, 在 1.5 MPa、150 s 条件下总多酚的含量达到最大。	蒸汽爆破过程中细胞壁的摩擦损伤会导致结合到多糖或蛋白质上的共轭酚类化合物的释放。	[18]
油茶籽	1.6 MPa, 60 s	与比未处理组相比, 多酚质量浓度显著提高了 279.20%。	油茶籽经蒸汽爆破处理后表面层次增加, 结构变得粗糙, 有利于萃取溶剂的可触及性进而提高了多酚的提取率。	[19]
花生壳	0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 MPa, 15、30、45、60、75 s	随着蒸汽爆破压力的升高和维压时间的延长, 木犀草素得率呈先增加后减少趋势, 在 1.2 MPa、45 s 条件下得率最高。	黄酮类成分大部分被包裹在细胞壁中, 随着爆破强度的增强, 有效地打破花生壳内部细胞壁的阻碍作用。在高温高压条件下可能会促使花生壳中活性成分发生化学变化, 导致黄酮类物质发生降解, 另外细胞内部溶出的黄酮类物质可又重新聚合形成不溶性物质。	[20]
茶渣	0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 MPa, 3 min	随蒸汽爆破强度的增加, 茶多酚呈现出先增加后减少。	蒸汽爆破可使茶渣产生多孔结构导致茶多酚的有效析出, 但活性酚羟基在高温高压下会热降解。	[21]
苦荞麸皮	1.5 MPa, 60 s	多酚和黄酮的释放量都呈增加趋势。	蒸汽爆破处理促进黄酮糖苷去糖苷化成苷元, 去除糖基后的苷元生物活性优于糖苷。	[22]
橄榄渣	150、160、170 °C, 15~90 min	随着爆破强度的增加, 酚类化合物羟基酯醇和 3, 4-二羟基苯乙二乙醇的释放量逐渐增加。	蒸汽处理在高温和压力的共同作用下打破细胞壁的结构, 提高了酚类物质的溶出率。	[23-24]
黄豆渣	0.5、1.0、1.5、2.0 MPa, 30、60、120 s	6 种大豆异黄酮(大豆苷、大豆苷元、黄豆苷、黄豆黄素、染料木苷、染料木素)含量均显著增高。黄豆黄苷在 2.0 MPa、60 s 含量最高, 其余 5 种大豆异黄酮均在 2.0 MPa、30 s 时含量达到最大值。	豆渣经蒸汽爆破处理后, 其片状结构的完整性遭受破坏, 逐渐变成更多更小的颗粒, 导致表面积增加, 与溶剂的可触及性增大, 异黄酮容易被提取出来。当蒸汽爆破强度过高时, 小颗粒发生聚集, 导致异黄酮的提取率下降。	[25]
粉葛	1.0、2.0 MPa, 30、40、60、80 s	在较低压力条件下(1.0 MPa), 随着维压时间的延长, 总黄酮提取量增加, 当压力达到 2.0 MPa 时, 随着维压时间的持续增加, 黄酮量先增加后降低	蒸汽爆破预处理可以减弱粉葛细胞壁的阻碍作用, 致使比表面积增大、传质阻力减小、溶剂渗透加快, 促进了活性成分的提取。高压高温条件下, 过长的维压时间导致黄酮发生降解, 且细胞内部溶出的黄酮又重新聚合形成不溶性物质。	[26]
大麦	180 °C, 60 s	与传统水煮相比, 蒸汽爆破可使大麦中的总酚和总黄酮含量分别提高 6.4% 和 30.5%; 游离阿魏酸和可溶性阿魏酸分别提高了 119.8% 和 193.0%。	淀粉的存在可能会降低蒸汽爆破对酚类物质释放的影响。蒸汽爆破通过直接破坏细胞壁基质或水解细胞壁中酚类和多糖之间的酯键, 从细胞液泡中释放出结合的酚类物质。	[27]
无花果叶	0.2、0.4 MPa, 3 min	蒸汽爆破预处理(0.2 MPa, 3 min)后, 无花果叶中黄酮类化合物的提取率比未处理的提高了 55.9%。然而, 较剧烈的蒸汽爆破条件(0.4 MPa, 3 min)并未导致黄酮类化合物的产量增加。	基于多孔结构的分析, 蒸汽爆破后中值孔径增加, 而弯曲度减少, 导致比表面积值下降, 强化了黄酮类化合物的提取过程; 黄酮类化合物通常以糖苷形式存在, 但剧烈的蒸汽爆破可能会导致黄酮类化合物的脱糖基化, 从而导致黄酮类化合物提取量下降。	[11]
松针	0.5~2.0 MPa, 20~120 s	随着蒸汽爆破强度的增加, 总黄酮的提取率先增加后降低。	在极短的时间内释放加压蒸汽可破坏松针紧密的结构。停留时间影响水解反应, 在较短的停留时间内, 水解反应进展不充分, 而在较长的停留时间下, 降解的黄酮类化合物会重新聚合成不溶性物质。	[28]
漆树果	190 和 200 °C, 3 和 5 min	黄酮含量显著增加。在 200 °C、5 min 爆破条件下, 黄酮类物质含量显著增加, 槲皮苷可水解转化为槲皮素, 槲皮素的生成率达到 84.51%。	蒸汽爆破可使漆树果产生更小的颗粒和微孔, 增加了比表面积, 有利于黄酮的提取。	[29]

致结合酚酸的释放; 另外, 木质素的解聚也可增加酚类物质的产率。不同的加热过程可使原料中游离酚增加而结合酚下降^[4]。Yeo 等^[44] 研究指出扁豆经热处理后, 结合态与游离酚的比率均有所下降, 加热能使不溶于水的酚醛共价键解离, 导致它们从种子基质中解放出来, 转化为游离酚。蒸汽爆破处理也可导致豆渣中的膳食纤维发生降解和断裂, 使一些原来与这些大分子物质结合的大豆异黄酮转变为游离态^[25]。HPLC 测定蒸汽爆破后的松针中黄酮苷元含量比未经处理组高 3.17 倍, 而糖苷含量降低了 57%^[28]。类黄酮作为一类重要的多酚类物质, 可分为游离、可溶的酯类或共轭物和不可溶的结合形式^[4]。

食品加工过程中的酸水解、碱水解、酶水解、热降解和机械化作用等可使多酚与细胞壁物质之间的共价作用或非共价作用解除, 而导致结合态多酚向游离态多酚转化。蒸汽爆破是一个自水解过程, 具有类

酸性作用, 可形成小分子的有机酸, 可溶性结合物(黄酮苷)可在有机酸的作用下水解并转化为游离苷元, 也可导致羧基和酚羟基的增加以及 β -O-4 结构的显著降低^[45-46]。蒸汽爆破产生的高温、高压对不稳定化学键(如糖苷键)的破坏, 导致预处理过程中发生化学变化, 细胞内结合态的黄酮转化为游离态, 且木质素、纤维素类物质发生降解^[26]。从微观结构上看, 蒸汽爆破可导致生物质内部结构分解和颗粒尺寸减小, 另外肽链中的一些共价键被破坏, 然后在聚合物链内重新结合形成新的键, 从而改变聚合物的最终结构^[47]。

1.4 影响蒸汽爆破效果的主要因素

处理强度指饱和蒸汽温度和维压时间的协同效应, 它对预处理的效果有直接影响^[48], 能够增大固相物的内孔面积, 使大部分半纤维素发生自水解, 这些都有助于提高多酚的提取率。在较低压力条件下(1.0 MPa), 随着维压时间的延长, 粉葛总黄酮提取量

增加;在 2.0 MPa 处理条件下,随着维压时间的持续增加,黄酮量先增加后降低^[26]。在 200 ℃、5 min 的蒸汽爆破条件下,漆树果黄酮类物质的转化率最高^[29]。但过高的处理强度会导致酚类物质不同程度的降解或聚合,甚至会导致植物生物质的炭化^[34]。Mrad 等^[49]研究也指出高处理强度会导致结合酚变性。适当的蒸汽爆破处理强度可以有效地提高植物中多酚的提取率,强度过低时提取率下降是因为蒸汽爆破是自水解过程,作用时间短则反应不充分,当汽爆强度过高时,小颗粒发生聚集,导致提取率下降。

蒸汽爆破处理对植物原料组分分离和超分子结构的影响与原料的孔径有密切关系。纤维原料的形态结构和超分子结构变化程度取决于原料的孔隙度,通常情况下孔隙度较大的有利于爆破处理,所需强度弱一些,孔隙度小的爆破条件强一些。Sui 等^[50]研究表明,平均孔径与提取参数相关性最大。蒸汽爆破后的黄芪,大孔面积百分比(100~100000 nm)由 8.25% 增大到 91.57%,是提取性能提高的主要原因。

蒸汽爆破前的预浸泡处理是影响蒸汽爆破的重要过程^[51-52]。预浸泡处理的主要目的是实现纤维软化与膨胀,使纤维分离免受机械损伤。此外,纤维膨胀有助于增加水蒸气的渗透强度和水化作用,从而提高处理效果。常用的预浸处理试剂为碱液、水及稀酸溶液,橄榄种壳用硫酸预浸后,在 200 ℃ 下汽爆处理 2 min 后戊糖产率为 63%;而不加硫酸预浸时,即使将处理强度提高到 215 ℃,戊糖产率也只有 39%^[53]。松针用水预浸 1.5 h 后,在 1.2 MPa、60 s 条件下进行汽爆处理,黄酮类物质的提取率最高为 49.5 mg/g;而未预浸处理组在相同汽爆条件下提取率只有 21.0 mg/g^[28]。适当的预浸处理会使原料纤维膨胀,增加水蒸气的渗透强度和水化作用,从而提高蒸汽爆破处理效果。

影响蒸汽爆破的因素还有原料的蛋白质含量、pH、水分含量等本身特性^[54]。蛋白质颗粒表明带有很多极性基团,如羟基、羧基等和水有高度亲和性。蒸汽爆破过程中蛋白质与水蒸气相遇时很容易在蛋白质颗粒表面形成一层水膜,影响汽爆效果。另外,具有细胞结构的植物原料在高温高压介质下汽相蒸煮,可形成小分子的有机酸,易使半纤维素降解成可溶性糖,而原料本身 pH 较低则会促进这一过程。

2 蒸汽爆破对植物多酚抗氧化活性的影响

2.1 体外抗氧化活性

植物多酚的一个重要功效是具有很强的抗氧化活性,以上论述了蒸汽爆破对原料中多酚的存在形态、结合方式、含量及组成的影响,相应的对其抗氧化活性也会产生明显的影响。Chen 等^[18]在 0.5~2.5 MPa 压力下对大豆皮爆破处理 30~150 s,发现其酚类提取物的抗氧化活性明显提升,在 1.0 MPa、50 s 和 2.0 MPa、90 s 条件下清除 DPPH· 能力最强,两组之间没有明显差异。沙棘果渣经蒸汽爆破处理

后,与未爆破组相比 DPPH· 和 ·OH 的 IC₅₀ (半数抑制浓度) 值分别下降 44% 和 78%^[55]。同样,随着爆破强度(0.2~1.0 MPa) 的增加,茶渣提取物的 FRAP 还原能力和 O₂ 清除能力明显增加,最大抑制效果分别在 logR₀=2.83 和 logR₀=2.55^[21]。苦荞麸皮结合酚提取物的体外氧自由基吸收能力在 1.5 MPa、60 s 蒸汽爆破条件下提高了 270%^[12]。唐宇等^[22] 也对苦荞麸皮进行了研究,通过模拟胃肠消化全阶段显示,经蒸汽爆破处理后苦荞麸皮的 ORAC 值均高于未蒸汽爆破组,这可能是由于蒸汽爆破处理促进黄酮糖苷去糖苷化生成生物活性更优的苷元。以上研究结果表明蒸汽爆破预处理能提高植物原料的抗氧化活性。

Noda 等^[43] 研究指出,大蒜在蒸汽压力为 15 atm,时间为 1、3、5 min,提取物的自由基清除活性 EC₅₀ (半最大效应浓度) 值分别为 7.444、0.538 和 0.202 g/L,说明在一定压力下作用时间越长,抗氧化活性越高。在蒸汽压力为 30 和 45 atm 时,在 1~10 min 的蒸汽时间内 DPPH· 的 EC₅₀ 值从 0.3 降至 0.14 g/L,说明大蒜中的部分酚类物质是低分子的,经蒸汽爆破后快速减压至常压后,以低分子酚类物质的形式溶解于水中,同时多糖也被降解。蒸汽爆破后大蒜提取物具有较高的抗氧化活性,而在 30 atm 下处理 5 min,其酚类物质含量(93.7 mg/g) 最高,而抗氧化活性最高值在 45 atm 下处理 5 min,是因为在 30 和 45 atm 的蒸汽压力下产生了糠醛和 5-羟甲基糠醛等热解产物,蛋白质、脂肪和其他物质也会发生降解,这些产物也有助于提高抗氧化活性。

适当的蒸汽爆破能显著提高物料的抗氧化活性,而高强度蒸汽爆破处理有可能造成抗氧化成分的损失^[56]。籽粒苋籽实经 0.6 MPa、60 s 蒸汽爆破处理后 DPPH· 清除率最高达到 76.62%±2.98%,是未蒸汽爆破组的 4.6 倍,但压力上升到 1.5 MPa 时 DPPH· 清除率会降低^[57]。张瑞婷^[58] 研究发现蒸汽爆破条件 1.5 MPa、90 s 时,麦麸提取液清除 DPPH· 最高,持续提高压力和时间,反而呈下降趋势,与籽粒苋籽实结果相似。Cheng 等^[36] 详细研究了蒸汽爆破对红豆中游离酚和结合酚的抗氧化活性影响,结果表明游离酚和结合酚的 FRAP、DPPH·、ABTS⁺ 的清除能力随着爆破压力的增强和维压时间的延长,都表现出先上升后下降的趋势,相比较,结合酚的抗氧化活性高于游离酚;且多酚含量与 DPPH·、FRAP、ABTS 之间具有显著的相关性,决定系数 R² 值分别为 0.784、0.909、0.937。Chen 等^[18] 采用双变量相关分析也表明经爆破处理后大豆种皮总酚类物质含量、总黄酮含量与 DPPH 值、ABTS 值呈显著相关(P<0.01),且 DPPH 值与 ABTS 值也呈正相关,表明酚类和黄酮类物质是发挥抗氧化活性的主要成分。同样,经蒸汽爆破后紫甘薯花色苷的 DPPH· 清除能力和 ·OH 清除能力有一定的提高^[59],可能由于花色苷组分相对含量发生了变化,或蒸汽爆破导致花色苷糖苷键的断裂,

使其分子结构中的活性基团(酚羟基)暴露出来,从而提高了抗氧化活性。Gong等^[4]研究也表明,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。

适宜的蒸汽爆破预处理使多酚降解成低分子形式,从而提高抗氧化活性,蛋白质、脂肪和其他物质发生降解,其降解产物也有助于提高抗氧化活性,并且多酚物质含量与抗氧化活性值呈显著正相关。对椰枣^[60]、大蒜皮^[61]、柑橘皮渣^[14]、秋葵籽^[62]、青稞^[63]、麦麸粉^[64]、油茶籽油^[65]、竹材^[51]等原料进行蒸汽爆破预处理,也证实了蒸汽爆破能有效促进多酚物质的释放,同时提高抗氧化能力。

2.2 细胞内抗氧化活性

多酚物质在细胞水平上的抗氧化活性,将有助于开发利用其作为防癌剂、心血管保护剂、神经退化抑制剂等潜在药用价值。苦参叶在0.5 MPa的蒸汽压力下,120 s内山茶素A可脱糖转化为芹菜素,转化率达94%以上,芹菜素的形成能显著提高提取物的细胞抗氧化活性。DSC(示差扫描量热仪)分析显示,山茶素A在160℃开始出现明显的吸热峰,随后出现放热峰,芹菜素从350℃开始出现一个尖锐的吸热峰,为其结晶形态的熔点,这表明山茶素A在较高温度下可转化为芹菜素^[66]。蒸汽爆破前苦参叶中游离酚细胞抗氧化能力的 EC_{50} 值为77.61 mg/mL,蒸汽爆破后的游离酚 EC_{50} 值显著下降到36.01 mg/mL^[12],而结合酚没有显示细胞抗氧化活性,说明蒸汽爆破能显著提高游离酚的含量,并提高了细胞抗氧化能力^[67]。同样地,玉米、大米、小麦、燕麦、大麦和荞麦等全谷物中的不溶性结合酚类物质没有细胞抗氧化活性^[68]。与山奈酚、木犀草素和槲皮素相比,咖啡酸和阿魏酸的细胞抗氧化活性较低^[69-70],推测蒸汽爆破处理后咖啡酸和阿魏酸的降解可能导致游离态的山奈酚、木犀草素和槲皮素的组成比例发生变化,从而增强游离酚的细胞抗氧化活性。木犀草素和槲皮素具有良好的亲脂性,相反,芦丁和咖啡酸等较亲水的酚类物质,其细胞抗氧化活性较低或没有^[70],蒸汽爆破处理导致结合态咖啡酸的产生,细胞内抗氧化活性较低。

3 结语

蒸汽爆破技术可适用于各种生物质物料,预处理条件易于调节控制,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。近年来的研究主要用于食品原料的预处理以及功效成分的提取,但需要注意的是较高的温度或者长时间的维压会引起食品的糊化、焦化等变质现象。蒸汽爆破技术作为食品加工行业中的一项新技术,还需要深入探究:a.食品原料基质的组成特点与蒸汽爆破效果之间的关系;b.蒸汽爆破对食品原料中活性成分的释放机制还没完全清楚,例如蒸汽爆破强化活性成分的提取传质机

理及多孔结构变化的规律;c.构建蒸汽爆破过程多阶段质量传递模型;d.如何进一步控制好原料处理的强度和均匀度,避免造成有效成分的降解和美拉德反应;e.联合多种预处理方法,进一步提高有效成分的提取率;f.在蒸汽爆破过程中是否对食品营养价值及安全性产生影响;g.目前通过动物模型研究蒸汽爆破对植物多酚体内抗氧化活性的研究没有检索到相关文献,应该进一步通过体内和体外联合实验研究其抗氧化等活性。随着研究的深入,会进一步拓展爆破技术在食品加工行业的利用范围。

参考文献

- [1] XING C, WANG L J, WANG X Q. Recent studies on free and bound phenolic compounds in edible plants: A review[J]. *Food Science*, 2020, 41(5): 266-275.
- [2] 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. [YAN C Z, YE F Y, ZHAO G H. Research progress of polyphenol forms in food[J]. *Food Science*, 2015, 36(15): 249-254.]
- [3] MASON W H. Process and apparatus for disintegration of wood and the like[P]. U. S Patent: 1578609, 1926-03-30.
- [4] 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.
- [5] YU Z D, ZHANG B L, YU F Q, et al. A real explosion: The requirement of steam explosion pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 335-341.
- [6] ANTONIO SERRANO, FERNANDO G FERMOSO, BERNABÉ ALONSO-FARIÑAS, et al. Phenols recovery after steam explosion of olive mill solid waste and its influence on a subsequent biomethanization process[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 169-178.
- [7] FERRI M, HAPPEL A, ZANAROLI G, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran[J]. *New Biotechnology*, 2019, 56: 38-45.
- [8] FRANCISCO P M, LORENA M A S, DIEGO L, et al. Steam explosion pretreatment to obtain eco-friendly building blocks from oil palm mesocarp fiber[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 143: 111907.
- [9] LU H X, LIN X Y, HE B H, et al. Enhanced separation of cellulose from bamboo with a combined process of steam explosion pretreatment and alkaline-oxidative cooking[J]. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2020, 35(3): 386-399.
- [10] MARQUES F P, SOARES A K L, LOMONACO D, et al. Steam explosion pretreatment improves acetic acid organosolv delignification of oil palm mesocarp fibers and sugarcane bagasse[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 175: 304-312.
- [11] 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.
- [12] LI W Z, ZHANG X L, HE X Q. Effects of steam explosion pretreatment on the composition and biological activities of tartary

- buckwheat bran phenolics[J]. *Food & Function*, 2020, 11(5): 4648–4658.
- [13] YU G W, GUO T T, HUANG Q D. Preparation of rapeseed oil with superhigh canolol content and superior quality characteristics by steam explosion pretreatment technology[J]. *Food Science and Nutrition*, 2020, 8(5): 2271–2278.
- [14] 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.
- [15] 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 & Agriculture*, 2017, 97(13): 4467–4475.
- [16] CUBERO-CARDOSO J, ANDRÉS MUÑOZ-ARJONA, TRUJILLO-REYES N, et al. Mesophilic semi-continuous anaerobic digestion of strawberry extrudate pretreated with steam explosion[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 2–11.
- [17] CHRISTINA DORADO, RANDALL G CAMERON, JOHN A MANTHEY, et al. Bench scale batch steam explosion of Florida red and white grapefruit juice processing residues[J]. *Future Foods*, 2021.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [ZHANG S Y, ZHENG L L, AI B L, et al. Effect of steam explosion pretreatment on quality of tea seed (*Camellia oleifera* Abel.) oil obtained by aqueous extraction[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 124–130.]
- [20] 赵鹏成, 易军鹏, 李欣, 等. 花生壳木犀草素蒸汽爆破预处理工艺优化及结构分析[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 181–186, 192.
- [ZHAO P C, YI J P, LI X, et al. Optimization of steam explosion pretreatment of peanut shell and its effect on physicochemical properties of luteolin[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(7): 181–186, 192.]
- [21] 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.
- [22] 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]. *食品发酵与工业*, 2019, 45(3): 103–109.
- [TANG Y, ZHANG X L, HE X Q, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of tartary buckwheat bran treated by steam explosion in simulated gastrointestinal digestion *in vitro*[J]. *Food Fermentation and Industry*, 2019, 45(3): 103–109.]
- [23] ÖZGE SEÇMELER, ÖZLEM GÜÇLÜ ÜSTÜNDAĞ, JUAN FERNÁNDEZ-BOLAÑOS, et al. Effect of subcritical water and steam explosion pretreatments on the recovery of sterols, phenols and oil from olive pomace[J]. *Food Chemistry*, 2018, 265: 298–307.
- [24] ANTONIO LAMA-MUÑOZ, FÁTIMA RUBIO-SENENT, ALEJANDRA BERMÚDEZ-ORIA, et al. The use of industrial thermal techniques to improve the bioactive compounds extraction and the olive oil solid waste utilization[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 55: 11–17.
- [25] 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, 27.
- [JIN Y H, LIU C Z, XU X, et al. Effect of steam explosion treatment on soybean isoflavones of okara[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(10): 16–20, 27.]
- [26] 张祺, 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.
- [ZHANG Q, YI J P, LI X, et al. Effect of steam explosion on total isoflavone content and antioxidant capacity of *Puerariae thomsonii* Radix[J]. *Food Science*, 2016, 37(9): 40–44.]
- [27] GONG L, 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 & Preservation*, 2016, 40(2): 239–248.
- [28] 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]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(17): 3806–3812.
- [29] CHEN G Z, CHEN H Z. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1934–1938.
- [30] 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.
- [31] CHEN Y, ZHANG R, LIU C, et al. Enhancing antioxidant activity and antiproliferation of wheat bran through steam flash explosion[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(7): 3028–3034.
- [32] 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(3): 806–812.
- [33] 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.
- [34] STADLER R H, WELTI D H, STÄMPFLI A A, et al. Thermal decomposition of caffeic acid in model systems: Identification of novel tetraoxygenated phenylindan isomers and their stability in aqueous solution[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(3): 898–905.
- [35] MOON J K, SHIBAMOTO T. Formation of volatile chemicals from thermal degradation of less volatile coffee components: Quinic acid, caffeic acid, and chlorogenic acid[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(9): 5465–5470.
- [36] 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.

[37] ARRIETA-BAEZ D, DORANTES-ÁLVAREZ D, MARTINEZ-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.

[38] FIDDLER W, PARKER W E, WASSERMAN A E, et al. Thermal decomposition of ferulic acid[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1967, 15(5): 757–761.

[39] DAS A K, SINGH V. Antioxidative free and bound phenolic constituents in pericarp, germ and endosperm of Indian dent (*Zea mays* var. indentata) and flint (*Zea mays* var. indurata) maize[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 13: 363–374.

[40] TANG Y, ZHANG B, LI X H, et al. Bound phenolics of quinoa seeds released by acid, alkaline, and enzymatic treatments and their antioxidant and α -glucosidase and pancreatic lipase inhibitory effects[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(8): 1712–1719.

[41] ALSHIKH N, DE C A C, SHAHIDI F. Phenolics of selected lentil cultivars: Antioxidant activities and inhibition of low-density lipoprotein and DNA damage[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 18: 1022–1038.

[42] SHAHIDI F, YEO J D. Insoluble-bound phenolics in food[J]. *Molecules*, 2016, 21(9): 12–16.

[43] NODA Y, ASADA C, SASAKI C, et al. Extraction method for increasing antioxidant activity of raw garlic using steam explosion[J]. *Biochemistry Engineering Journal*, 2013, 73(15): 1–4.

[44] YEO J D, SHAHIDI F. Effect of hydrothermal processing on changes of insoluble-bound phenolics of lentils[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 38: 716–722.

[45] PARTHAPRATIM DAS, ROMINA B STOFFEL, MARIA C AREA, et al. Effects of one-step alkaline and two-step alkaline/dilute acid and alkaline/steam explosion pretreatments on the structure of isolated pine lignin[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 120: 350–358.

[46] MANIET G, SCHMETZ Q, JACQUET N, et al. Effect of steam explosion treatment on chemical composition and characteristic of organosolv fescue lignin[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 99: 79–85.

[47] ZHAO S G, LI G D, ZHENG N, et al. Steam explosion enhances digestibility and fermentation of corn stover by facilitating ruminal microbial colonization[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 244–251.

[48] 任天宝, 高卫镭, 苏同福, 等. 瞬时弹射式蒸汽爆破处理生物质的能量模型及能耗理论分析[J]. *高压物理学报*, 2020, 34(5): 187–194. [REN T B, GAO W K, SU T F, et al. Energy model and theoretical analysis of energy consumption for instantaneous ejection steam explosion treatment of biomass[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(5): 187–194.]

[49] 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 Sci-*

ence and Technology, 2014, 59: 874–882.

[50] SUI W J, CHEN H Z. Extraction enhancing mechanism of steam exploded *Radix astragali*[J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49(12): 2181–2190.

[51] SUN S L, WEN J L, MA M G, et al. Structural features and antioxidant activities of degraded lingins from steam exploded bamboo stem[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 56: 128–136.

[52] SULZENBACHER D, DENISE ATZMÜLLER, HAWE F, et al. Optimization of steam explosion parameters for improved biotechnological use of wheat straw[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021: 1–12.

[53] FERNÁNDEZ-BOLAÑOS J, FELIZÓN B, HEREDIA A, et al. Steam-explosion of olive stones: Hemicellulose solubilization and enhancement of enzymatic hydrolysis of cellulose[J]. *Biore-source Technology*, 2001, 79(1): 53–61.

[54] 刘蕊琪, 宋莲军, 沈玥, 等. 蒸汽爆破技术在食品大分子物质改性中的研究进展 [J/OL]. *食品与发酵工业*, 2021: 1–7. [LIU R Q, SONG L J, SHEN Y, et al. Research progress of steam explosion technology in modification of food macromolecules [J/OL]. *Food and Fermentation Industry*, 2021: 1–7. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027248>.]

[55] TU J Q, LIU H P, SUN N X, et al. Optimization of the steam explosion pretreatment effect on total flavonoids content and antioxidative activity of seabuckthorn pomace by response surface methodology[J]. *Molecules*, 2019, 24(1): 1–9.

[56] JUTTUPORN W, THIENGKAEW P, RODKLONGTAN A, et al. Ultrasound-assisted extraction of antioxidant and antibacterial phenolic compounds from steam-exploded sugarcane bagasse[J]. *Sugar Technology*, 2018, 20(5): 599–608.

[57] 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. [FANG F. Effect of steam explosion treatment on amaranth seeds antioxidant capacity[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(15): 21–25, 30.]

[58] 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]. 郑州: 河南工业大学, 2016. [ZHANG R T. The effect of steam explosion on the composition and antioxidant activity of wheat bran polyphenols[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.]

[59] 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(10): 26–30. [YI J P, YANG Y H, LI X, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the antioxidant and antibacterial properties of purple sweet potato anthocyanins[J]. *Agricultural Products Processing*, 2019(10): 26–30.]

[60] HONG Y J, TOMAS-BARBERAN F A, KADER A A, et al. The flavonoid glycosides and procyanidin composition of Deglet Noor dates (*Phoenix dactylifera*) [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2006, 54(6): 2405–2411.

[61] 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(11): 3397–

3402.

[62] 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.

[63] HONG Q Y, CHEN G J, WANG Z R, et al. Impact of processing parameters on physicochemical properties and biological activities of Qingke (highland hull-less barley) treated by steam explosion[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): e14793.

[64] KONG F, WANG L, GAO H, et al. Process of steam explosion assisted superfine grinding on particle size, chemical composition and physico-chemical properties of wheat bran powder[J]. Powder Technology, 2020, 371: 154–160.

[65] ZHANG S Y, PAN Y G, ZHENG L L, et al. Application of steam explosion in oil extraction of camellia seed (*Camellia oleifera* Abel.) and evaluation of its physicochemical properties, fatty acid, and antioxidant activities[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1004–1016.

[66] 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.

[67] 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 & Pharmacological Sciences, 2015, 19(6): 1022–1029.

[68] OKARTER N, LIU C S, SORRELLS M E, et al. Phytochemical content and antioxidant activity of six diverse varieties of whole wheat[J]. Food Chemistry, 2010, 119(1): 249–257.

[69] WAN H X, LIU D, YU X Y, et al. A Caco-2 cell-based quantitative antioxidant activity assay for antioxidants[J]. Food Chemistry, 2015, 175: 601–608.

[70] WOLFE K L, LIU R H. Structure-activity relationships of flavonoids in the cellular antioxidant activity assay[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(18): 8404–8411.