

超高压在植物活性物质提取中的应用研究进展

王 菁^{1,3}, 乔勇进², 柳洪入², 王 晓², 叶章颖¹, 林思敏³, 王春芳^{2*}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海 201403;
3. 珀莱雅化妆品股份有限公司, 杭州 310023)

摘 要: 植物中含有多种活性物质, 并具有抗氧化、抗菌、免疫调节、抗炎等多重功效, 如何从植物中快速、高效、环保地提取活性物质一直以来是食品、医药、化妆品等行业最重要的研究领域之一。超高压技术作为一种非热加工技术, 近年来被广泛研究用于食品加工、提取等方面。超高压提取技术的应用提高了植物活性物质的提取率, 缩短了提取时间, 可作为一种替代传统固液萃取植物活性化合物的方法。该文重点综述了超高压技术的发展历程及其在植物提取方面的发展应用, 超高压提取原理与提取工艺, 及其在黄酮、多酚、多糖等多种活性物质提取中的应用, 与传统热回流提取方法相比, 超高压提取技术可以在常温或较低温度下进行, 可有效缩短提取时间, 提高生物活性, 降低能耗。但超高压在提取植物活性物质方面的应用还面临超高压提取理论基础不完善, 提取物生物活性研究有待深入、设备成本高等诸多挑战, 有必要探索超高压与其他提取方法相结合的协同提取作用, 进一步揭示该技术所涉及的工作机制, 以期为深入应用超高压技术提取植物活性物质提供理论参考。

关键词: 超高压; 活性物质; 提取原理; 提取工艺; 应用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401242

中图分类号: TS255

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0272-11

王菁, 乔勇进, 柳洪入, 等. 超高压在植物活性物质提取中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 272-282.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401242 <http://www.tcsae.org>

WANG Jing, QIAO Yongjin, LIU Hongru, et al. Research progress of ultra-high pressure on the extraction of plant active substances[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 272-282. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401242 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

植物中含有众多的生物活性物质, 如多酚、人参皂苷、番茄红素等^[1]。这些活性物质通常具有抗氧化、美白保湿、抗炎抗菌等多重功效, 被广泛应用于食品、医药、化妆品等领域^[2-3]。目前, 活性物质提取技术已被广泛研究, 如何高效提取此类有价值的天然物质并发挥其商业价值, 已成为重要的研究领域^[4-5]。植物中生物活性物质的传统提取方法包括浸提、煎煮、回流提取、索氏提取、超声提取、微波提取、酶解提取等, 这些传统的提取方法通常具有周期长、产率低、有效成分损失大等缺点, 制约了天然产物提取的发展^[3-4,6]。为了克服这些不足, 亟需寻找一种新型、高效的提取方法, 而超高压提取技术有望能满足这一需求。

超高压 (ultra-high pressure, UHP) 技术, 又称高静压 (high hydrostatic pressure, HHP) 技术, 是指将原料放入超高压容器中, 以水或其他流体作为压力传递介质, 在一定压力 (100~1 000 MPa) 和一定温度下加工适当

的时间, 以改变原料理化特性和化学反应速度的一种加工技术^[7-8]。超高压技术可追溯到 18 世纪, 最初被应用于材料加工区域, 19 世纪末美国开始应用于食品领域的食品杀菌^[8-9], 日本在 20 世纪末成为超高压食品加工技术的主要研究和应用国家之一, 中国对超高压技术的研究开始于 20 世纪 90 年代。在 1999 年, 超高压技术首次应用于从咖啡中提取咖啡因, 随后证实, 使用超高压从番茄酱废料中提取番茄红素和从番茄果肉中提取类胡萝卜素可以获得更高的提取率^[10]。2004 年, 吉林工业大学 ZHANG 等^[11]率先将该技术应用于中药提取。随着技术的不断发展成熟, 超高压技术在功能活性物质 (黄酮、萜类、皂苷、多糖等) 提取上的研究逐渐增多^[12-16]。目前, 超高压技术已经被美国食品药品监督管理局认定为一种环境友好的方法, 已成功并广泛应用于从植物材料中提取生物活性物质^[17]。

超高压处理会破坏植物材料的三维结构^[18], 对构成生物大分子的氢键、离子键等非共价键会产生影响, 但对共价键无影响, 即生物大分子可能发生变性, 但对皂苷、黄酮、生物碱等小分子物质无影响^[19-21]。与传统提取方法相比, 超高压提取具有提取时间短、提取温度低、提取得率高、提取物活性高、溶剂消耗少、应用范围广、绿色环保等优势^[4,22-23]。本文对超高压技术的发展、提取原理、提取工艺及其在植物多种活性物质提取中的应用进行了详细综述, 以期超高压提取技术应用提供理论参考。

收稿日期: 2024-01-31 修订日期: 2024-04-27

基金项目: 上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台项目 (21DZ2292200); 上海工程技术研究中心项目 (19DZ2251600)

作者简介: 王菁, 博士, 研究方向为活性物开发。

Email: wangjing48@proya.com

※通信作者: 王春芳, 助理研究员, 博士, 研究方向为农产品保鲜加工。

Email: fhwcfl@126.com

1 超高压提取原理

1.1 超高压技术基本原理

超高压技术的应用主要遵循帕斯卡（Pascal）定律和勒夏特列（Le Chatelier's）两个基本原理，超高压加工示意图如图 1 所示^[24-25]。帕斯卡定律是指在超高压处理过程中，容器中物料的各部位受到近似相等的压力，并且压力会瞬时、均匀地沿各个方向传递到整个物料，且处理效果与物料的形状、体积等无关^[8,26]。因此，超高压处理时样品没有压力梯度^[27]。勒夏特列原理是指，在一个已经达到平衡的反应中，如果影响反应平衡的条件发生改变，反应平衡将朝着减小这种改变的方向进行，从而达到新的平衡^[28]。

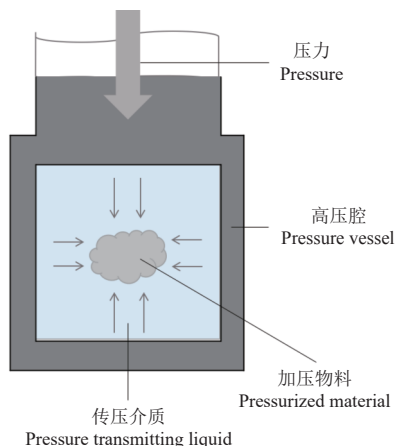


图 1 超高压加工示意图

Fig.1 Schematic of ultra-high pressure processing

1.2 超高压提取原理

一般提取过程主要包括两个阶段，一是植物材料在提取溶剂中浸泡以促进溶胀和水化，二是可溶性成分通过扩散和渗透过程从材料中传质到溶剂中^[29]。超高压提取是在常温或较低温度条件下采用 100~1 000 MPa 的压力对物料进行处理，在特定的压力下保压一段时间，保压完成后迅速将压力下降至常压（<10 s），随后进行分离纯化，从而达到提取的目的（图 2）^[30-31]。超高压处理时溶剂渗透到内部，细胞内外压力达到平衡（活性物质达到溶解平衡）（图 2a→2b），卸压后活性物质通过渗透或者组织及细胞破坏转移到提取液中（图 2c），从而实现活性物质的提取。超高压可导致原始组织、细胞壁、细胞膜和细胞器的破坏，从而增强溶剂对细胞组织的渗透和可溶性组分的溶解，提高传质速率，促进细胞内容物的释放^[32]。超高压的提取原理可以从以下 3 个阶段加以说明^[33]：

一是升压阶段，压力由常压（0.1 MPa）升至几百兆帕，短时间内细胞内外产生较高的压力差，促进溶剂快速渗透到细胞或组织内部。在这一阶段，细胞或组织随着压力的快速增加发生形变，如果超过其形变极限，造成结构破裂，将增大固液接触面积；如果没有超过其形变极限，提取溶剂在高压的推动下，加速溶剂进入原料细胞和组织内，从而有效缩短溶剂的渗透平衡时间，使有效成分溶解在提取溶剂中，有效提高提取效率。

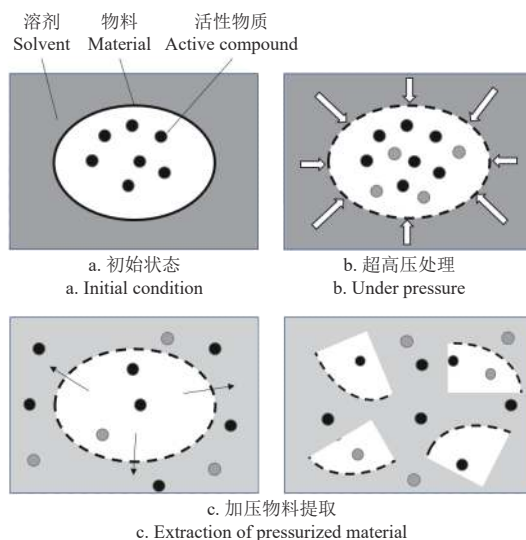


图 2 超高压提取活性物质示意图

Fig.2 Schematic of ultra-high pressure extraction on active substances

二是保压阶段，升压阶段引起压力的快速变化，可以改变体系体积，推动化学平衡的移动。快速渗透到细胞内的溶剂与目标物质充分接触，可在短时间内实现目标物质的溶解平衡^[34]，因此保压阶段一般在几分钟内完成。

三是卸压阶段，卸压过程一般在几秒内完成，原料细胞受到的压力迅速减小至常压，溶解了有效成分的溶液在超高反向压力差的作用下形成强大的湍流和高剪切力，导致细胞膨胀，流体强烈冲击细胞壁、细胞膜、质膜、液泡和微管等组织，从而造成明显的变形和膜损伤，增加膜透性、降低传质阻力，使有效成分溶解和扩散出细胞和组织^[35]。卸压时间越短，有效成分扩散的传质阻力越小，溶解了有效成分的溶剂快速转移到细胞外，达到高效提取的目的。

升压阶段、保压阶段和卸压阶段在超高压提取技术中起着重要的作用，决定最终提取效果。

2 超高压提取工艺

2.1 超高压提取流程

超高压提取不同样品或不同的有效成分，提取工艺或有所不同，但主要包括原料预处理、样品处理、超高压提取、分离纯化等步骤。原料的预处理是提取工艺的第一步操作，主要包括原料的挑选、清洗、干燥和粉碎等；样品处理主要指超高压处理前的样品称量、溶剂配制、浸泡、封装等；超高压提取是将样品进行超高压处理，完成有效成分的提取；分离纯化主要是采用醇沉、大孔树脂吸附、色谱技术等分离纯化工艺处理粗提取物，继而得到高纯度的有效成分^[36]。

2.2 超高压提取参数的影响

超高压提取的效率取决于操作条件的选择，包括压力水平、保压时间、料液比、温度、植物样品的水分含量和粒径、溶剂的类型和浓度等（表 1），其中溶剂、压力水平和温度被认为是影响超高压提取效果的 3 个最重要的参数^[4]。

表 1 超高压提取各类活性物质参数条件
Table 1 The parameters for ultra-high pressure extraction of various active substances

物质分类 Classification of substances	原料/提取物 Material/ extractive	参数及范围 Parameters and ranges	显著影响因素 Significant influencing factors	最优条件 Optimum process condition	参考文献 Reference
黄酮 Flavonoids	沙棘/黄酮	压力 (300~500 MPa), 乙醇浓度 (60%~80%), 料液比 (1:30~1:50 g·mL ⁻¹), 保压时间 (8~12 min)	压力, 乙醇浓度	415 MPa, 乙醇浓度 72%, 料液比 1:40 g·mL ⁻¹ , 保压时间 10 min	[37]
	黄芩/黄芩苷	含水量 (30%~50%, 溶剂为氯化胆碱:乳酸=1:1), 保压时间 (2~6 min), 压力 (300~500 MPa), 料液比 (1:100~1:120 g·mL ⁻¹)	保压时间, 压力, 料液比	含水量 40% (体积比), 提取压力 400 MPa, 保压时间 4 min, 料液比 1:110 g·mL ⁻¹	[38]
	落叶松/二氢槲皮素	压力 (50~250 MPa), 茶皂素浓度 (7%~10%), 料液比 (1:6~1:12 g·mL ⁻¹), 提取次数 (2~6 次)	压力, 茶皂素浓度, 料液比, 提取次数	压力 157 MPa, 茶皂素浓度 8%, 料液比 1:11.5 g·mL ⁻¹ , 提取次数 3 次	[39]
	桑葚/花青素	压力 (300~500 MPa), 乙醇浓度 (60%~80%), 料液比 (1:9~1:15 g·mL ⁻¹)	压力>乙醇浓度>料液比	压力 430 MPa, 乙醇浓度 75%, 料液比 1:12 g·mL ⁻¹	[40]
	蓝莓渣/花色苷	压力 (300~500 MPa), 乙醇浓度 (50%~70%), 料液比 (1:15~1:25 g·mL ⁻¹), 保压时间 (6~12 min)	乙醇浓度>料液比>压力	压力 400 MPa, 保压时间 9 min, 乙醇浓度 60%, 料液比 1:20 g·mL ⁻¹	[41]
多酚 Phenolics	咖啡豆/绿原酸、咖啡因	压力 (200~600 MPa), 温度 (5~50 ℃), 保压时间 (1~5 min), 提取溶剂为水	-	25 ℃、600 MPa、2.5 min	[42]
	冬香薄荷叶/总酚、总黄酮	压力 (200~500 MPa), 乙醇浓度 (0~70%), 保压时间 (1~20 min)	乙醇浓度	(i) 提取率和抗氧化活性: 500 MPa, 20 min, 0% 乙醇 (ii) 总酚、总黄酮、抗氧化活性: 348 MPa, 20 min、35% 乙醇 (iii) 色素 (叶绿素和类胡萝卜素): 500 MPa, 1 min, 70% 乙醇	[2]
	椰枣/酚类	乙醇浓度 (0~100%), 料液比 (1:10~1:70 g·mL ⁻¹) 温度 (25~65 ℃), 压力 (100~600 MPa)	溶剂浓度、料液比	乙醇浓度 60.54%, 料液比 1:70 g·mL ⁻¹ , 温度 65 ℃, 压力 600 MPa	[4]
	艾叶/多酚	料液比 (1:15~1:45 g·mL ⁻¹) 压力 (250~350 MPa), 水浴温度 (60~80 ℃), 水浴时间 (20~40 min), 提取溶剂为乙醇, 保压时间 10 min	料液比, 水浴时间	料液比 1:33 g·mL ⁻¹ , 水浴时间 34 min, 压力 301 MPa, 水浴温度 71 ℃	[29]
多糖 Polysaccharides	巴戟天/多糖	料液比 (1:10~1:14 g·mL ⁻¹), 压力 (300~500 MPa), 保压时间 (5~7 min), 提取溶剂为水	料液比, 压力	料液比 1:12 g·mL ⁻¹ , 压力为 420 MPa, 保压时间为 6.5 min,	[43]
	铁皮石斛/多糖	压力 (100~500 MPa), 乙醇浓度 (30%~70%), 料液比 (1:10~1:50 g·mL ⁻¹), 保压时间 (1~5 min)	-	乙醇浓度 50%、压力 300 MPa、保压时间 2 min, 料液比 1:30 g·mL ⁻¹	[44]
	黄精/多糖	压力 (200~400 MPa), 料液比 (1:15~1:25 g·mL ⁻¹), 保压时间 (5~13 min), 提取溶剂为水	料液比>压力>保压时间	料液比 1:21 g·mL ⁻¹ , 压力 315 MPa, 保压时间 9.5 min	[45]
	火龙果皮/果胶	压力 (200~400 MPa), 温度 (40~60 ℃), 保压时间 (20~60 min), 料液比 (1:10 g·mL ⁻¹ , 复合酶溶液), 提取溶剂为水	压力>温度>时间	保压时间 42.75 min, 提取温度 51.61 ℃, 提取压力 316.44 MPa, 纤维素酶浓度 14 U/mL, 果胶酶浓度 150 U/mL, 木瓜蛋白酶浓度 3 U/mL, pH 值为 5.0	[46]
皂苷 Saponins	藜麦种皮/皂苷	压力 (250~350 MPa), 乙醇浓度 (50%~70%), 料液比 (1:100~1:200 g·mL ⁻¹), 保压时间 (6~12 min)	料液比>溶剂浓度>保压时间>压力	保压时间 8.27 min, 压力 294 MPa, 乙醇浓度 62%, 料液比 1:162 g·mL ⁻¹	[47]
	油茶籽粕/茶皂素	压力 (250~350 MPa), 乙醇浓度 (45%~75%), 料液比 (1:15~1:25 g·mL ⁻¹), 保压时间 (6~10 min)	溶剂浓度>压力>保压时间	提取压力 308 MPa、保压时间 8.5 min、乙醇浓度 65 %、料液比 1:20 g·mL ⁻¹	[48]
	葫芦巴/薯蓣皂苷	压力 (300~400 MPa), 保压时间 (6~12 min), 乙醇浓度 (60%~80%), 料液比 (1:20~1:40 g·mL ⁻¹)	压力	压力 360.30 MPa, 保压时间 9.39 min, 料液比 1:30 g·mL ⁻¹ , 乙醇浓度 70.90%	[49]
	人参茎叶/皂苷	压力 (200~400 MPa), 乙醇浓度 (60%~80%), 料液比 (1:15~1:45 g·mL ⁻¹)	压力>溶剂浓度>料液比	压力 314 MPa, 乙醇浓度 71%, 料液比 1:32 g·mL ⁻¹	[50]
生物碱 Alkaloids	喜树/喜树碱、羟喜树碱	压力 (50~150 MPa), 十二烷基磺酸钠浓度 (20~100 g·mL ⁻¹), 料液比 (1:10~1:30 g·mL ⁻¹), 保压时间 (1~5 min)	压力, 溶剂浓度, 料液比, 保压时间	压力 110 MPa, 料液比 1:25 g·mL ⁻¹ , 表面活性剂浓度 60 mg·mL ⁻¹ , 保压时间 3.9 min	[51]
	博落回/苯并[c]菲啶类生物碱	压力 (100~500 MPa), 溶剂 (氯仿、95% 乙醇、甲醇和酸性水溶液 (pH 值为 2)), 料液比 (1:10~1:30 g·mL ⁻¹), 保压时间 (1~5 min)	-	压力 200 MPa, 乙醇浓度 95%, 料液比 1:30 g·mL ⁻¹ , 保压时间 2 min	[52]
	菊花/吡咯利西啶生物碱	压力 (0.1~200 MPa)、循环次数 (1~5)、乙酸浓度 (0~10%)	压力	压力 124 MPa, 乙酸浓度 10%, 循环次数 1 次	[53]
其他 Others	番茄/番茄红素	压力 (250~450 MPa), 己烷浓度 (40%~60%)	压力>溶剂浓度	压力 450 MPa, 己烷浓度 60%	[54]
	丹参/丹参酮	离子液体浓度 (0.25~1.25 mol·L ⁻¹), 压力 (100~500 MPa), 保压时间 (1~5 min), 料液比 (1:10~1:30 g·mL ⁻¹)	-	离子液体浓度 0.5 mol·L ⁻¹ , 压力 200 MPa, 保压时间 2 min, 料液比 1:20 g·mL ⁻¹	[55]
	红豆杉枝叶/紫杉醇	天然表面活性剂 HREOA 质量分数 (0.8%~1.6%), 压力 (50~150 MPa), 保压时间 (3~7 min), 料液比 (1:20~1:40 g·mL ⁻¹)	压力>表面活性剂质量分数>料液比	天然表面活性剂 HREOA 质量分数 1.4%, 压力 94 MPa, 保压时间 6 min, 料液比 1:35 g·mL ⁻¹	[56]

注: -表示未报道。Note: -not reported.

2.2.1 提取溶剂

植物中含有多种生物活性物质，不同的提取溶剂用于不同组分的提取物，因此，超高压提取可以使用不同溶剂来提取强极性、弱极性和非极性分子^[57]，类似于传统方法。黄酮类、多酚类、多糖类多为极性分子，皂苷类多为中等极性或两性分子，生物碱一般是弱极性到中等极性分子，番茄红素则是非极性分子。溶剂的极性应与目标化合物的极性相近，活性物质可以很容易的溶解在具有相似极性的溶剂中^[38]，但在选择合适的溶剂时，还应评估溶剂毒性。如 WU 等^[29]研究了 4 种不同有机溶剂对艾叶多酚提取率的影响，发现丙酮的提取率最高，乙醇次之，随后是甲醇和水，考虑到溶剂的安全性和残留风险，后续试验中就选择了乙醇作为提取溶剂。BASKARAN 等^[58]以水、乙醇及其混合物（1:1）为溶剂，利用超高压提取绿咖啡豆中活性物质，研究发现乙醇提取物的总酚含量最高。乙醇是迄今为止最常用的溶剂，具有低毒、绿色制造、绿色提取，极性适中等特点^[4]，适用于从植物中提取多种活性化合物^[32]。

通常，对于固定量的原料，使用的溶剂体积越大，溶剂侧的稀释效果就越大，细胞内部和外部溶剂之间的浓度差就更大，因此，当溶剂体积增加时，大量的溶剂通常可以更有效地溶解目标物活性成分，从而提高提取率^[2]。超高压提取目标物质不单纯依靠溶剂浓度梯度，而是主要依靠压力差来提供传质动力^[33]。与常压条件相比，在加压条件下使用溶剂可以提高溶解度和传质性能^[51]，因此超高压提取可以减少提取时间，提高提取率，减少溶剂的消耗。

目前，相关研究主要关注了超高压提取对不同溶剂的提取率影响，有必要对超高压提取中不同溶剂提取物的生物活性、生物利用度、保质期和稳定性等进行进一步的研究。

2.2.2 提取压力

提取压力是影响超高压提取目标物产量的一个重要因素。通常，提高压力会使提取效率提高。压力越高，进入植物组织细胞的溶剂越多，渗透到溶剂中的化合物越多，在保压期间将建立细胞内外之间的溶剂浓度平衡。此外，高压可以提高目标物质的溶解度，降低溶剂的黏度和表面张力^[59]。LIMSANGOUAN 等^[6]在利用超高压提取罗望子仁粉中木葡聚糖的研究中发现，压力从 125 MPa 提高至 250 MPa 和 500 MPa 时，可以显著提高提取率，但在 250 MPa 和 500 MPa 之间没有显著差异，需要将高压提取时间由 5 min 延长至 15 min，才可显著提高提取率。LIN 等^[42]研究了超高压提取对咖啡豆中绿原酸和咖啡因的提取率、抗氧化活性等影响，结果表明，在 400 MPa 条件下，绿原酸和咖啡因的提取率高于 200 MPa 条件，但当压力增加至 600 MPa 时，提取率没有显著增加，这是因为 400 MPa 时细胞结构已被完全破坏，有效成分已被提取出来。从表 1 中可以看到，超高压提取优化工艺条件中压力在 300~450 MPa 的居多。由此可知，尽管压力提高有利于提取率的提升，但压力

并非越高越好，而是应该根据不同物料选择合适的压力。

2.2.3 提取温度

超高压提取过程中的温度是影响提取效率和选择性的关键因素之一。高温的使用可以提高提取效率，但在提取不耐热化合物时，高温可能会导致目标提取物的降解。李莎等^[60]利用超高压辅助提取初榨橄榄油，在 20~60 °C 范围内其出油率先上升后下降，当温度为 30 °C 时其出油率最大。超高压提取咖啡豆中绿原酸和咖啡因，当温度由 5 °C 提高至 25 °C 时，两者含量分别由 4.32%、3.27% 提升至 7.48%、5.66%^[42]。提取温度的选择主要取决于所需活性化合物的稳定性和提取率。

超高压提取还受其他多方面因素的影响，如原料预处理、超高压提取设备（间歇式、半连续式、连续式）、提取时间等都可能会影响超高压的提取效率。但由于超高压提取的时间较短，进一步探究超高压提取时间的影响较为困难，如果能够使用更先进的设备实现对升压时间和降压时间的精确控制，就可以对提取时间及保压时间对超高压提取的影响进行更深入的研究^[61]。此外，采用栅栏技术辅助超高压提取，可以进一步提升超高压的提取效率，如酶法辅助超高压提取^[3,46]、超高压辅助胶束法提取^[39]、超高压酶法超声耦合提取^[62]、超高压耦合低共熔溶剂^[63]等多种技术联用的方式。

3 超高压在活性物质提取中的应用

超高压提取技术作为一种潜在替代传统固液萃取植物活性化合物的方法，有着巨大的市场前景与发展潜力。目前，它已经被广泛地应用于多种活性物质（如黄酮类、多酚类、多糖类、皂苷类、生物碱等）的提取中。

3.1 黄酮类化合物提取

黄酮类化合物作为一类次级代谢产物广泛分布于自然界的各种植物中^[64]。根据三碳链的氧化程度和 B 环的连接位置等特点，可将黄酮类化合物分为黄酮类、黄酮醇、二氢黄酮类、二氢黄酮醇类、花色苷类等 15 种^[65]，其具有抗氧化、抗炎、抗衰老等多重功效^[66]。

与传统溶剂萃取法相比，超高压提取法可以显著提升黄酮类物质提取率。陈智玲等^[41]通过单因素试验和响应面优化得到超高压提取蓝莓渣花色苷的最佳工艺为提取压力 400 MPa，保压时间 9 min，乙醇浓度 60%，料液比 1:20 g/mL，最优条件下花色苷的提取量为 5.93 mg/g，超高压提取法提取效果要优于传统溶剂浸提法和超声波辅助提取法，花色苷提取量分别提高 25.11%、10.02%。与此类似的，在最优超高压提取工艺条件下，超高压提取法将沙棘黄酮的纯度从 1.46% 提高到了 13.26%^[37]，桑葚花青素的得率从 1.37 mg/g 提升到了 1.97 mg/g^[40]。

黄酮类物质水溶性较差，通常以有机溶剂提取，有学者探究了胶束提取法等辅助超高压提取的效果。WANG 等^[38]使用深共晶溶剂超高压提取黄芩中黄芩苷，筛选出了深共晶溶剂氯化胆碱:乳酸（1:1），在含水量 40%（体积比），提取压力 400 MPa，提取时间 4 min，液固比为 110 mL/g 的条件下，最大提取率为 116.8 mg/g，虽

然与传统热回流提取的黄芩苷提取率 (110.4 mg/g) 相差不多, 但提取时间从 3 h 大幅缩短至 4 min。杨帆等^[39]以兴安落叶松为原料, 采取超高压辅助胶束提取技术提取二氢槲皮素, 从 13 种表面活性剂中筛选了茶皂素为提取胶束, 在最优条件下, 二氢槲皮素提取率高达 84.35%±1.20%。并与微波提取 (69.7%)、超声提取 (64.6%)、回流提取 (71.5%) 等提取工艺对比, 结果表明超高压辅助胶束提取技术的单位能耗与 CO₂ 排放量最低。这些新型的绿色提取溶剂, 为超高压提取黄酮类物质提供了一种新方法。

与传统方法相比, 超高压提取技术可以在更短的时间和低能耗下获得更高的黄酮类化合物提取率, 是一种简单、快速、高效的提取技术。

3.2 多酚类化合物提取

多酚类化合物是植物体内最常见的次级代谢产物之一, 因具有抗氧化、抗炎、抑菌、降血糖等生物活性受到研究者的广泛关注^[67-68]。

超高压提取多酚可以显著提高提取率, 提升体外抗氧化活性。LIN 等^[42]采用超高压辅助提取生咖啡豆中的生物活性成分, 以水为溶剂, 超高压提取物中绿原酸 (chlorogenic acid, CGA) 和咖啡因的含量分别为 3.20~5.75 mg/100 g 和 4.32~7.95 mg/100 g, 显著高于传统热回流提取方法 (分别为 2.92 mg/100 g 和 3.54 mg/100 g)。在 25 °C、600 MPa、2.5 min 的最佳提取条件下, 提取物对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制率分别为 27.8% 和 26.7%, 对自由基的清除活性最高为 81.5%, 显著高于热回流提取物的 22%、10% 和 65.9%。MOREIRA 等^[2]报道在最优工艺条件下超高压提取冬香薄荷叶活性成分的提取率为 18.18%, 比对照提取液 (0.1 MPa) 的提取率 (9.23%) 提高约 96.9%, 而且与对照提取物相比, 超高压提取物的总酚类物质提高了 40%, 铁还原能力 (ferric reducing antioxidant power, FRAP)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, ABTS) 自由基清除率这 3 种方法测定的抗氧化活性分别提高了 29%、48% 和 70%, 表明该方法可以有效提高多酚提取物的质量和抗氧化活性。

超高压提取多酚不仅可以提高提取率, 增强抗氧化活性, 还可以显著缩短提取时间。WU 等^[29]研究获得了艾叶多酚最佳超高压提取工艺条件为压力 301 MPa, 料液比 1:33 g/mL、水浴时间 34 min、水浴温度 71 °C, 该条件下多酚提取率为 64.96 mg/g, 比对照组 0.1 MPa 下提取物的提取率和抗氧化活性要高, 比超声提取、酶法辅助提取和索氏提取的水浴时间要短 (分别为 60 min、90 min 和 360 min), 提取率高 (分别为 56.24 mg/g、46.12 mg/g 和 11.81 mg/g)。该研究认为超高压提取增强多酚抗氧化活性的原因可能是高压影响了酚类物质与蛋白质和多糖的相互作用, 还可以改变花青素和酚酸的结构, 导致新化合物的形成。

超高压提取对酚类物质抗氧化活性的影响已有研究, 但对其生物利用度的改变的研究还较少。尽管超高压辅助提取技术可以有效缩短提取时间, 且提取的多酚活性高, 但也有研究指出, 在大批量提取蓝靛果多酚的情况下, 由于超高压设备的限制, 其提取效率和提取量不及超声波提取^[69]。因此, 在实际应用中, 还要考虑超高压设备成本、大小与提取效率的关系。

3.3 多糖类化合物提取

多糖是一种通过糖苷键连在一起的天然高分子聚合物, 可参与细胞间识别、细胞间物质运输等生命过程, 具有抗氧化、抗衰老和免疫调节等多种生理活性^[70-71]。

多糖属于大分子物质, 超高压提取可能对其结构产生影响, 从而影响其生物活性。ZHANG 等^[43]采用超高压提取巴戟天多糖, 并选择超临界辅助超声提取和热回流提取两种提取方法进行比较。虽然超高压萃取的提取率 (3.07%) 高, 分别是热回流法 (1.54%) 的 1.994 倍和超临界超声萃取 (2.78%) 的 1.104 倍。但超高压提取的抗氧化活性普遍低于热回流提取和超临界超声提取, 超高压对多糖的活性有一定的破坏作用, 这可能是由于超高压导致多糖构象发生改变引起的。

但王敏^[45]通过超高压法提取的黄精多糖与热水浸提制备的黄精多糖在分子结构上没有显著差异, 没有影响黄精多糖的生物活性, 只是对其结晶状态略有影响。扫描电镜结果显示, 超高压提取的黄精多糖微观结构更加紧密, 推测超高压能破坏原料细胞的细胞壁, 因而具有更高的提取效率。

超高压提取法自身的提升效果有限, 有研究报道了酶、超声等协同超高压提取的效果。CHEN 等^[46]通过酶法辅助超高压提取火龙果果皮中的果胶, 其得率为 30.43%, 比热回流法 (15.73%) 提高了 93.45%。王冲等^[72]采用超高压-超声波协同法提高藜麦 β -葡聚糖的提取率。结果表明, 超高压-超声波协同法提取 β -葡聚糖的最佳参数为: 超声功率 300 W, 超声时间 15 min, 超高压压力 300 MPa, 超高压时间 4 min, 水提 pH 值为 10, 水提料液比 1:18。在最优条件下, 得出超高压-超声波协同法的提取率为 1.66%, 与水提法、超声法、超高压法相比, 提取率分别提高了 159.38%、43.10%、23.88%, 由此可见, 超声波协同可以进一步提升超高压提取 β -葡聚糖的得率。

超高压提取可能引起多糖内部分子扭曲、拉伸、折叠或膨胀等变化, 导致多糖大小的变化。一般来说, 超高压提取不会改变糖苷键的组成、糖基的序列、相邻糖基的连接方式和异位构型, 但会影响单糖的组成比、空间构型、螺旋结构和结晶度^[73]。此外, 在一定压力范围内 (200~600 MPa) 也会导致蛋白质变性沉淀, 降低多糖中难以分离的蛋白质、酯等杂质, 提高多糖的纯度, 结晶度也随之发生变化^[74]。因此, 超高压提取多糖的理化性质、结构特性与生物活性之间关系和机理需要重点关注。尽管如此, 超高压提取仍不失为一种提取多糖的有效手段, 还可以探索与其他方法的协同作用以进一步

提高提取效果。

3.4 皂苷类化合物提取

皂苷是由碳水化合物和三萜或类固醇苷元部分组成的两亲性分子，由于皂苷存在于许多药用植物和中草药中，表现出大量的生物活性，包括抗真菌、抗菌、抗病毒、抗炎、抗氧化和免疫调节等作用，可以作为开发天然产物衍生药物的良好物质^[75]。

目前对于超高压提取皂苷类物质的研究，大多集中在提取工艺优化上。王志娟等^[47]采用超高压提取技术对藜麦种皮中的皂苷进行提取，在最佳工艺条件下皂苷含量达 78.12 mg/g。王志娟^[49]还将超高压提取技术首次应用于葫芦巴中薯蓣皂苷的提取，在最优条件下提取率高达 5.02%，显著优于超声醇提法（2.27%）和复合酶协同超声法（3.36%）。通过对比不同提取方法处理对葫芦巴细胞的破碎程度，发现超高压提取法对葫芦巴细胞的破碎效果最佳。说明超高压提取技术是一种简单、高效提取葫芦巴中薯蓣皂苷的方法。

超高压提取不仅能提高提取率，还能提升有效成分含量。MOK 等^[62]报道了超高压酶法超声耦合提取对野生模拟人参中人参皂苷的提取效果。该研究发现超高压酶法超声耦合提取的人参皂苷含量最高，为 47.62 mg/g，而且提取物中 7 种主要的人参皂苷含量比常压下柠檬酸缓冲液提取法高 1.21-10.63 倍，而且其中 2 种成分在传统提取或者酶法辅助提取中均未检测到。在 300 MPa 高压下，还能影响人参皂苷 Rg3 立体异构体的生成速度。结果表明，超高压酶法超声耦合提取可以提高人参皂苷的质量，但是该方法对人参皂苷感官品质及生化特性的影响还有待进一步研究。

与传统热回流提取相比，超高压提取可以在常温下进行，可以很好减少高温对皂苷结构的影响。超高压技术在提取方面的应用为皂苷类，尤其为中草药活性物质的提取提供了新思路，但相关研究还处于起步阶段，超高压提取对皂苷类活性物质的抗炎、抗氧化等生物活性与体内抗氧化作用等的影响，以及与其他技术协同提取的效果等问题都还有待进一步研究。

3.5 其他天然活性物质提取

超高压提取除了应用于黄酮类、多酚类、多糖类、皂苷类化合物的提取之外，在生物碱、丹参酮等天然活性物质的提取中也有相关研究。

WANG 等^[51]采用超高压辅助胶束提取喜树碱和羟喜树碱，得到最佳提取条件为：提取压力 110 MPa，料液比 1:25 g/mL，表面活性剂浓度 60 mg/mL，保压时间 3.9 min。在上述最佳条件下，喜树碱和羟喜树碱的实际提取率为 82.68% 和 89.02%，分别为索氏提取的 1.03 倍和 1.02 倍，乙醇匀浆提取的 1.01 倍和 1.01 倍，超声提取的 1.02 倍和 1.03 倍，微波提取的 1.03 倍和 1.03 倍。超高压辅助胶束提取喜树碱和羟喜树碱的能耗只有 5.71×10^3 J，索氏提取和乙醇匀浆提取的能耗为 3.90×10^6 J，超声提取和微波提取的能耗为 1.29×10^6 J。超高压提取可以显著降低能耗。

超高压提取技术除了可以提取有效活性物质外，也有学者反向利用该技术，用于去除食品物料中的有害物质。WANG 等^[53]利用超高压提取技术去除菊花中有害物质吡咯利西啶生物碱，同时保留较高的绿原酸、总黄酮等抗氧化物质。在压力 124 MPa、乙酸浓度 10%、循环次数为 1 次的最优条件下，吡咯利西啶生物碱的去除率最高为 47%，同时保持较高的绿原酸（88%）、木犀草素-7- β -D-葡萄糖苷（82%）、3,5-二咖啡基奎宁酸（90%）和总黄酮（79%）。

丹参是一种重要的中草药，丹参酮是主要存在于丹参根部的主要疏水性生物活性成分，又名总丹参酮，是脂溶性菲醌化合物，具有抗氧化、抗菌等多种临床功效。LIU 等^[55]采用离子液体超高压辅助萃取法从丹参中提取丹参酮。最佳参数为 200 MPa 的压力、2 min 的提取时间和 1:20 g/mL 的固液比。与热回流提取和超声波提取等技术相比，超高压提取技术提取率高，提取时间最短，能耗最低。此外，使用超高压提取技术可以在室温下进行，有利于提取热不稳定化合物，是一种从丹参中快速提取丹参酮的高效提取技术。

吴铭芳^[56]采用超高压辅助胶束溶液提取红豆杉枝叶中紫杉醇成分结果表明，提取压力为 100 MPa 时物料叶片表面出现更多更大的中空孔洞，即可以达到很好的提取效果，继续增大压力则结构变化不显著。

超高压技术除了直接用于活性物质提取外，还有研究利用超高压作为相关物料的预处理方法，在常规提取前对物料进行超高压预处理，可以显著提高芒果叶提取物^[76]和茶梨叶提取物^[77]中的酚类和黄酮类物质含量，提高其抗氧化活性和细胞保护能力。ZHAO 等^[78]在提取果胶前利用超高压预处理对鲜橘皮果胶进行结构修饰，果胶提取率提高了 41.1%，粗提物的果胶甲基酯酶活性高于未处理，预处理提取的果胶甲基化程度较低。

目前，有关超高压提取技术的研究大多集中在提取工艺优化与提取机理上，对活性物质及其抗氧化、抑菌等生物活性方面的影响及其机理研究相对较少，在体内抗氧化活性等方面的研究就更少了，有必要开展相关研究，为超高压提取技术的工业化应用奠定理论基础。

4 总结与展望

本文综述了超高压提取植物活性物质的原理、工艺及其在多种活性物质提取中的应用。大量研究表明，超高压提取技术可以作为传统固液提取技术的替代方案，具有提取时间短，提取物活性高，提取率高，能耗低等优点，而且与其他提取技术（酶、超声、胶束等）协同作用可以进一步提高提取效率，显示出从植物原料中提取生物活性物质的巨大潜力。然而，在超高压提取植物活性物质方面还存在许多挑战：1）超高压以及协同其他提取技术的提取效果等理论机理尚不完善，不能保证超高压提取技术可以取代传统方法。2）超高压加工可能会改变活性物质的一些物理化学特征，可能增加或减少这些化合物的生物利用度，目前这方面的研究相对较少。3）

在多糖等大分子物质提取中,超高压对其结构修饰、理化功能特性、生物活性的影响等仍有待进一步研究。4)超高压设备投资和维护成本仍然很高。因此,有必要探索超高压与其他提取方法相结合的技术,探索超高压提取对活性物质的生物活性与体内抗氧化作用等影响,进一步揭示该技术所涉及的工作机制,改进提取工艺,同时开发更安全、容积更大、成本更低的超高压设备,以促进超高压提取技术在各领域的广泛应用与持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] MOREIRA S A, SILVA S, COSTA E, et al. Effect of high hydrostatic pressure extraction on biological activities and phenolics composition of winter savory leaf extracts[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(9): 841.
- [2] MOREIRA S A, PINTADO M, SARAIVA J A. Optimization of antioxidant activity and bioactive compounds extraction of winter savory leaves by high hydrostatic pressure[J]. *High Pressure Research*, 2020, 40(4): 543-560.
- [3] NGUYEN T M C, GAVAHIAN M, TSAI P J. Effects of ultrasound (UAE), high voltage (HVEF), high pressure (HPP) and combined methods (HVEF+UAE and HPP+UAE) on gac leaves extraction[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111131.
- [4] SEDRAOUI S, BADR A, BARBA M G M et al. Optimization of the ultrahigh-pressure-assisted extraction of phenolic compounds and antioxidant activity from palm dates (*Phoenix dactylifera* L.) [J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13(10): 1556-1569.
- [5] PICOT-ALLAIN C, MAHOMOODALLY M F, AK G, et al. Conventional versus green extraction techniques: A comparative perspective[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 40: 144-156.
- [6] LIMSANGOUAN N, CHARUNUCH C, SASTRY S K. High pressure processing of tamarind (*Tamarindus indica*) seed for xyloglucan extraction[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110112.
- [7] 王春芳, 毛 明, 胡菲菲, 等. 超高压和热处理后黄瓜汁感官品质的主观评价和仪器检测对比[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 278-286.
WANG Chunfang, MAO Ming, HU Feifei, et al. Comparison of sensory quality between subjective evaluation and instrument detection for cucumber juice with high pressure processing and heat treatment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(10): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王春芳. 超高压与温度的协同杀菌效应及其动力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG Chunfang. Synergistic Inactivation Effect of High Pressure and Temperature and Related Kinetic Studies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙伟. 超高压加工过程热特性与温度场模拟的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
SUN Wei. Thermal Characteristics and Temperature Field Simulation During High Pressure Processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [10] YAN L G, XI J. Micro-mechanism analysis of ultrahigh pressure extraction from green tea leaves by numerical simulation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 180: 51-57.
- [11] ZHANG S Q, ZHU J J, WANG C Z. Novel high pressure extraction technology[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 278(2): 471-474.
- [12] 王雪竹, 李梵, 张国治. 金花葵总黄酮的超高压提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(8): 69-72.
WANG Xuezhu, LI Fan, ZHANG Guozhi. Optimization of ultrahigh pressure extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from Aurea helianthus stem[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(8): 69-72. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐树来, 徐瑶, 尤婷婷, 等. 超高压辅助提取灵芝三萜的工艺优化及抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(20): 274-280.
XU Shulai, XU Yao, YOU Tingting, et al. Optimization of ultrahigh pressure assisted extraction of the triterpenoids from the *Ganoderma lucidum* and evaluation of its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20): 274-280. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐清华. 超高压法对人参化学组分提取率的影响及参麦酒开发[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
XU Qinghua. Effect of Ultra-high Pressure Processing on Extraction Ratio of Chemical Constituents of Ginseng and Development of *Ginseng Ophiopogon* Liquor [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [15] 黄姗, 时文六, 白天. 地黄叶多糖的超高压提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(5): 28-32.
HUANG Shan, SHI Wenliu, BAI Tian. Optimization of ultrahigh pressure extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Rehmannia glutinosa* libosch leaves[J]. *Food and Fermentation Science and Technology*, 2023, 59(5): 28-32. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孟继坤, 张楠, 吴浩, 等. 超高压提取铁皮石斛多糖工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(1): 157-163.
MENG Jikun, ZHANG Nan, WU Hao, et al. Optimization of ultra-high pressure extraction technology of polysaccharide from *Dendrobium officinale* and its antioxidant activities[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(1): 157-163. (in Chinese with English abstract)
- [17] TANG L Q, LIU H C, WEN J, et al. Study on ultrahigh-pressure extraction technology on properties of yellow extract from gardenia fruit[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 104.
- [18] 孙朋真, 曹建新, 赵天瑞, 等. 超高压预处理对西番莲果皮抗氧化能力及对 HepG2 细胞氧化损伤保护作用的影响

- [J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 83-91.
- SUN Pengzhen, CAO Jianxin, ZHAO Tianrui, et al. Effect of ultra-high pressure pretreatment on antioxidant capacity and cytoprotective activities against oxidative damage on HepG2 cells of peel of *Passiflora edulis* Sims[J]. *Food Science*, 2022, 43(1): 83-91. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王红迪, 严文霞, 蒋兵, 等. 超声辅助萌芽联合超高压处理对花生-黑豆芽复合汁品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 222-232.
- WANG Hongdi, YAN Wenxia, JIANG Bing, et al. Effects of ultrasonic-assisted germination combined with high hydrostatic pressure treatment on the quality of compound peanut-black bean sprout juice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(2): 222-232. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙思成, 刘璐璐, 徐新星, 等. 适宜超高压处理条件脱除大蒜臭味保持抗氧化和抑菌能力[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 308-314.
- SUN Sicheng, LIU Lulu, XU Xinxing, et al. Deodorization of garlic and keeping antioxidant activity and antimicrobial activity by appropriate high pressure processing condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(19): 308-314. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨浩, 张扬, 高建萍, 等. 基于超高压技术的牛骨蛋白绿色提取工艺初探[J]. *生物学杂志*, 2023, 40(6): 104-108.
- YANG Hao, ZHANG Yang, GAO Jianping, et al. Preliminary study on green extraction technology of bovine bone protein based on ultra high pressure technology[J]. *Journal of Biology*, 2023, 40(6): 104-108. (in Chinese with English abstract)
- [22] GALLEGO R, BUENO M, CHOURIO M A, et al. Use of high and ultra-high pressure based-processes for the effective recovery of bioactive compounds from *Nannochloropsis oceanica* microalgae[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2021, 167: 105039.
- [23] ZHENG M J, MA M H, YANG Y F, et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from *Porphyra haitanensis* by different methods[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2023, 242(P2): 125003.
- [24] PENG J K, LIU C, BAI K K, et al. Ultra-high-pressure technology for preservation of fresh aquatic foods: A review[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2023, 41(5): 313-322.
- [25] 陈梦婷, 郑昌亮, 汪兰, 等. 超高压技术在蛋白质改性和活性肽制备中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 298-304.
- CHEN Mengting, ZHENG Changliang, WANG Lan, et al. Progress in the application of ultra-high pressure technology in protein modification and bioactive peptide preparation[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 298-304. (in Chinese with English abstract)
- [26] NAVARRO-BAEZ J E, MARTÍNEZ L M, WELTI-CHANEs J, et al. High hydrostatic pressure to increase the biosynthesis and extraction of phenolic compounds in food: A Review[J]. *Molecules*, 2022, 27: 1502.
- [27] LEITE JÚNIOR B R C, TRIBST A A L. Effect of High-pressure Technologies on Enzymes: Science and Applications[M]. New York: Academic Press, 2023: 1-18.
- [28] 戴浩然, 冯雅, 何诗行. 食品超高压技术应用及装备研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(9): 179-182.
- DAI Haoran, FENG Ya, HE Shihang. Research progress of food high pressure technology and equipment[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(9): 179-182. (in Chinese with English abstract)
- [29] WU W, XIANG F, HE F. Polyphenols from *Artemisia argyi* leaves: Environmentally friendly extraction under high hydrostatic pressure and biological activities[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 171: 113951.
- [30] 訾鸿威. 超高压提取灵芝多糖及灵芝三萜的工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- ZI Hongwei. Study on Extraction Technology of the Process of *Ganoderma lucidum* Polysaccharides and Ganoderma Triterpenes by Ultra-high Pressure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [31] BALASUBRAMANIAM V M, BARBOSA-CÁNOVAS G V, LELIEVELD H L M. High Pressure Processing of Food Principles, Technology and Applications[M]. New York: Springer Science+Business Media, 2016: 175.
- [32] XI J. Ultrahigh pressure extraction of bioactive compounds from plants-A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1097-1106.
- [33] 陈静雯, 韩伟. 超高压技术在天然产物提取中的应用[J]. *机电信息*, 2018(26): 29-37.
- CHEN Jingwen, HAN Wei. Application of ultra-high pressure technology in natural product extraction[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2018(26): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [34] HUANG H W, HSU C P, YANG B B, et al. Advances in the extraction of natural ingredients by high pressure extraction technology[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 33(1): 54-62.
- [35] BAI C L, CHEN R Z, CHEN Y B, et al. Plant polysaccharides extracted by high pressure: A review on yields, physicochemical, structure properties, and bioactivities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263: 129939.
- [36] 刘长蛟. 红景天总黄酮超高压提取工艺及其粗提物生物活性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- LIU Changjiao. Study on the Extraction of Flavonoids From *Rhodiola sachlinese* by Ultrahigh Pressure Technology and Bioactivity of Its Extract[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [37] YAN Z, FENG X, LI X, et al. Sea buckthorn flavonoid extracted by high hydrostatic pressure inhibited ige-stimulated mast cell activation through the mitogen-activated protein

- kinase signaling pathway[J]. *Foods*, 2024, 13: 560.
- [38] WANG H, MA X D, CHENG Q B, et al. Deep eutectic solvent-based ultrahigh pressure extraction of baicalin from *Scutellaria baicalensis* Georgi[J]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3233.
- [39] 杨帆, 霍志伟, 朱雯, 等. 超高压辅助胶束法提取落叶松中二氢槲皮素的工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(23): 175-183.
- YANG Fan, HUO Zhiwei, ZHU Wen, et al. Optimization of ultrahigh pressure assisted micellar extraction of taxifolin from larch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(23): 175-183. (in Chinese with English abstract)
- [40] CHEN Z L, MA J, LI P, et al. Preparation of hypoglycemic anthocyanins from mulberry (*Fructus mori*) fruits by ultrahigh pressure extraction[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2023, 84: 103255.
- [41] 陈智玲, 马剑, 文博, 等. 超高压提取蓝莓渣花色苷的工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(21): 185-194.
- CHEN Zhiling, MA Jian, WEN Bo, et al. Optimization of ultrahigh pressure extraction and the antioxidant activity of anthocyanins from blueberry pomace[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(21): 185-194. (in Chinese with English abstract)
- [42] LIN Y H, HUANG H W, WANG C Y. effects of high pressure-assisted extraction on yield, antioxidant, antimicrobial, and anti-diabetic properties of chlorogenic acid and caffeine extracted from green coffee beans[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15: 1529-1538.
- [43] ZHANG S N, YI W N, WANG Z H, et al. Ultrahigh pressure extraction of polysaccharide from *Morinda officinalis* and effect on the polysaccharide structure[J]. *Separation Science and Technology*, 2021, 56(10): 1741-1751.
- [44] ZHANG W, ZHANG Y J, WANG J Y, et al. Combined ultrahigh pressure extraction and high-speed counter-current chromatography for separation and purification of three glycoside compounds from *Dendrobium officinale* protocorm[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2021, 26(13): 3934.
- [45] 王敏. 超高压提取黄精多糖的工艺及应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- WANG Min. Technology and Application of Ultra-high Pressure Extraction of *Polygonatum* Polysaccharide[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [46] CHEN R Z, LUO S J, WANG C X, et al. Effects of ultra-high pressure enzyme extraction on characteristics and functional properties of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel pectic polysaccharides[J]. *Food hydrocolloids*, 2021, 121: 107016.
- [47] 王志娟, 张炜, 田格, 等. 超高压法提取藜麦皂苷的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 45-50.
- WANG Zhijuan, ZHANG Wei, TIAN Ge, et al. Ultrahigh pressure extraction technology of saponins from quinoa husk[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(6): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [48] 杨孝辉, 郭君. 超高压法提取油茶籽粕中茶皂素的工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(2): 106-109.
- YANG Xiaohui, GUO Jun. Study on extraction of tea saponin from *Camellia oleifera* seed meal by ultrahigh pressure[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(2): 106-109. (in Chinese with English abstract)
- [49] 王志娟. 葫芦巴中薯蓣皂苷的提取与纯化研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021.
- WANG Zhijuan. Study on Extraction and Purification of Dioscin from *Trigonella Foenum-graecum* [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [50] 王志成. 人参茎叶皂苷提取工艺和多糖及木质纤维素生物活性研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2022.
- WANG Zhicheng. Study on Extraction Technology of Ginsenosides from Stems and Leaves of Panax Ginseng and Bioactivity of Its Polysaccharides and Lignocellulose [D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [51] WANG S Y, WANG L L, SUN C F, et al. Ultra-high pressure-assisted micelles for simultaneous and efficient extraction of two insoluble alkaloids from *Camptotheca acuminata* seeds[J]. *Industrial Crops Products*, 2023, 200: 116851.
- [52] ALI I, LI J C, LI C, et al. Efficient extraction and purification of benzo[c]phenanthridine alkaloids from *Macleaya cordata* (Willd) R. Br. by combination of ultrahigh pressure extraction and pH-zone-refining counter-current chromatography with anti-breast cancer activity in vitro[J]. *Phytochemical Analysis: PCA*, 2020, 32(3): 423-432.
- [53] WANG H, WANG Q, LAI A, et al. Multi-response optimization of pyrrolizidine alkaloids removal from *Chrysanthemum morifolium* by high-pressure extraction[J]. *Foods*, 2022; 11(23): 3827.
- [54] BRIONES-LABARCA V, GIOVAGNOLI-VICUÑA C, CAÑAS-SARAZÚA R. Optimization of extraction yield, flavonoids and lycopene from tomato pulp by high hydrostatic pressure-assisted extraction[J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 751-759.
- [55] LIU F, WANG D, LIU W, et al. Ionic liquid-based ultrahigh pressure extraction of five tanshinones from *Salvia miltiorrhiza* Bunge[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 110: 86-92.
- [56] 吴铭芳. 紫杉醇提取纯化与 pH 响应的抗肝癌靶向纳米粒制备及功能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- WU Mingfang. Extraction and purification of paclitaxel and preparation and functional evaluation of anti-hepatocellular carcinoma targeting nanoparticles with pH response[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [57] ALTUNER E, İŞLEK C, ÇETER T, et al. High hydrostatic pressure extraction of phenolic compounds from *Maclura pomifera* fruits[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11:

- 930-937.
- [58] BASKARAN K, RADHAKRISHNAN M. High-pressure processing-assisted in-situ extraction of caffeine, chlorogenic acid, phenolic content, and antioxidant properties of green coffee bean[J]. *Journal of food process engineering*, 2024, 47: e14551.
- [59] YANG B, WU Q, LUO Y, et al. High-pressure ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Hovenia dulcis*: Extraction, structure, antioxidant activity and hypoglycemic[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 676-687.
- [60] 李莎, 杨斯媛, 海光辉, 等. 超声波或超高压辅助提取初榨橄榄油的工艺优化及效果比较[J/OL]. *中国粮油学报*, 1-14 [2024-04-08]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000675>.
LI Sha, YANG Siyuan, HAI Guanghui, et al. Optimization or coMParison of effects of ultrasound and ultra-high pressure assisted extraction of virgin olive oil[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 1-14[2024-04-08]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000675>. (in Chinese with English abstract)
- [61] 王思莹. 羟基喜树碱的提取和仿生给药体系的构建及抗癌活性评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
WANG Siying. Extraction of Hydroxycamptothecin, Construction of Biomimetic Drug Delivery System and Evaluation of Its Antitumor Activity[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [62] MOK I K, JUNG H Y, KIM H, et al. Biotransformation of ginsenosides from Korean wild-simulated ginseng (*Panax ginseng* C. A. Mey.) using the combination of high hydrostatic pressure, enzymatic hydrolysis, and sonication[J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102687.
- [63] 戴康伟, 邹晓琴, 张名位, 等. 红枣多糖超高压耦合低共熔溶剂提取工艺优化及其抗氧化活性[J/OL]. *现代食品科技*: 1-10[2024-04-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0816>.
DAI Kangwei, ZOU Xiaoqin, ZHANG Mingwei, et al. Optimization of extraction process of jujube polysaccharide by ultrahigh pressure coupled deep eutectic solvent and its antioxidant activity[J/OL]. *Modern Food Science and Technology*: 1-10[2024-04-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0816>. (in Chinese with English abstract)
- [64] 伍依琪, 梁志森, 陈玉珍, 等. 高效液相色谱法同时测定保健食品中 6 种黄酮类化合物[J]. *食品与机械*, 2022, 38(8): 70-75.
WU Yiqi, LIANG Zhisen, CHEN Yuzhen, et al. Simultaneous determination of 6 flavonoids in health care products by highperformance liquid chromatography[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(8): 70-75. (in Chinese with English abstract)
- [65] 刘霞, 罗芳, 余银, 等. 黄酮类化合物与食品成分相互作用研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(10): 1009-1015.
LIU Xia, LUO Fang, SHE Yin, et al. Research process of interaction between flavonoids and food ingredients[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2017, 36(10): 1009-1015. (in Chinese with English abstract)
- [66] SHEN N, WANG T F, GAN Q, et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132531.
- [67] 黄修晴, 初众, 房一明, 等. 植物多酚降血糖机制的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 461-469.
HUANG Xiuqing, CHU Zhong, FANG Yiming, et al. Research progress on hypoglycemic mechanism of plant polyphenols[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 461-469. (in Chinese with English abstract)
- [68] RIBEIRO A M, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Edible films prepared with different biopolymers, containing polyphenols extracted from elderberry (*Sambucus nigra* L.), to protect food products and to improve food functionality[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13: 1742-1754.
- [69] 李新原, 李斌, 颜廷才, 等. 超高压与超声波对蓝莓果多酚提取及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 271-277.
LI Xinyuan, LI Bin, YAN Tingcai, et al. Comparative effects of ultra-high pressure and ultrasonic treatment on the extraction and antioxidant activity of polyphenols from *Lonicera caerulea* fruit[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 271-277. (in Chinese with English abstract)
- [70] LIU Z N, LIAO L Y, CHEN Q, et al. Effects of *Hericium erinaceus* polysaccharide on immunity and apoptosis of the main immune organs in Muscovy duck reovirus-infected ducklings[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 171: 448-456.
- [71] 陈瑞战, 殷微, 蔡艳, 等. 北虫草多糖的理化特征及抗氧化和免疫活性研究[J]. *分子科学学报*, 2020, 36(2): 160-169.
CHEN Ruizhan, YIN Wei, CAI Yan, et al. Characterization, antioxidant activity and immunomodulatory activity of polysaccharides from *Cordyceps Militaris*[J]. *Journal of Molecular Science*, 2020, 36(2): 160-169. (in Chinese with English abstract)
- [72] 王冲, 邹佳文, 陈虹均, 等. 超高压-超声波协同法提取藜麦 β -葡聚糖的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 39-44.
WANG Chong, ZOU Jiawen, CHEN Hongjun, et al. Extraction of quinoa β -Glucan by an ultra-high pressure-ultrasonic wave synergy method[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(6): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- [73] AHMADI S, YU C X, ZAEIM D, et al. Increasing RG-I content and lipase inhibitory activity of pectic polysaccharides extracted from goji berry and raspberry by high-pressure processing[J]. *Food hydrocolloids*, 2022, 126: 107477.
- [74] CHEN H, HUANG Y Z, ZHOU C C, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on structure and bioactivity of

- polysaccharides from large leaf yellow tea[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132862.
- [75] JUANG Y P, LIANG P H. Biological and pharmacological effects of synthetic saponins[J]. *Molecules*, 2020, 25(21): 4974.
- [76] ZHANG J, WANG Y D, XUE Q W, et al. The effect of ultra-high pretreatment on free, esterified and insoluble-bound phenolics from mango leaves and their antioxidant and cytoprotective activities[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130864.
- [77] ZHEN L, HE S, XUE Q, et al. Influence of ultra-high-pressure pretreatment method on chemical constituents, antioxidant and cytoprotective activities of free, esterified, and bound phenolics from *Anneslea Fragrans* Wall. leaves[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2023, 78: 407-418.
- [78] ZHAO W, XU Y, DORADO C, et al. Modification of pectin with high-pressure processing treatment of fresh orange peel before pectin extraction: Part I. The effects on pectin extraction and structural properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109516.

Research progress of ultra-high pressure on the extraction of plant active substances

WANG Jing^{1,3}, QIAO Yongjin², LIU Hongru², WANG Xiao², YE Zhangying¹, LIN Simin³, WANG Chunfang^{2*}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Research Institute of Crop Breeding and Cultivation, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 3. Proya Cosmetics Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: There are various sources of plant-active substances with biological activities, such as antioxidant, antibacterial, immunomodulatory, and anti-inflammatory. It is very necessary to rapidly, efficiently, and environmentally friendly extract these active substances in the food, medicine, and cosmetics industries. Among them, ultra-high pressure (UHP) with high hydrostatic pressure (HHP) has been widely applied in food non-thermal processing and extraction in recent years. The UHP can be expected to extract the plant active substances for the higher extraction yield and lower extraction time, compared with the traditional solid-liquid extraction. This review aims to introduce the development of UHP in food processing, in order to extract the flavonoids, polyphenols, polysaccharides, and saponins. The principles, processes, and applications were also covered to extract the various active substances, such as flavonoids, polyphenols, polysaccharides, and saponins. The assisted UHP extraction included the three stages: pressure boost, holding, and relief stage, which determined the extraction performance of UHP. Since the UHP tended to destroy the raw tissues, cell walls, cell membranes, and organelles, the solvents were penetrated into tissue cells to dissolve the soluble components for the high mass transfer and the release rate of cell contents. UHP processing included raw material pretreatment, sample treatment, UHP extraction, separation, and purification. The efficiency of UHP extraction depended on the operating conditions. The solvent, pressure level, and extraction temperature were the three most important parameters of the performance of UHP extraction. Furthermore, the UHP extraction was still an effective way to extract polysaccharides, although there were some effects on the structure and biological activity of polysaccharides. Compared with the traditional heat reflux extraction, the UHP extraction was carried out at room temperature or lower temperature, in order to reduce the impact of heat. The simple, rapid, and efficient UHP extraction effectively shortened the extraction time to improve the biological activity for energy saving. A huge market prospect and development potential were found in the UHP-assisted extraction. Previous studies were focused mainly on the extraction optimization and mechanism. Only a relatively few studies explored the performance of antioxidant, antibacterial, and biological activities in the active substances after UHP extraction. And even fewer studies were focused on in vivo antioxidant activities. Many challenges also remained in the UHP application to extract the active substances, such as the imperfect theoretical basis of UHP extraction and high equipment cost. It is necessary to explore the synergistic extraction of UHP combined with other extraction methods. The safer, larger volume and lower cost of UHP equipment can be developed to explore the influence of UHP extraction on the biological activity and antioxidant effect of active substances, particularly the mechanisms behind them. The finding can be expected to promote the wide application and sustainable development of UHP extraction in various fields.

Keywords: ultra-high pressure; active substances; extraction principle; extraction procedure; application