

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.09.038

# 植物多酚提取研究进展

## Research progress on the extraction of plant polyphenols

田富林<sup>1</sup> 黄文晶<sup>1</sup> 王展<sup>1,2</sup>TIAN Fu-lin<sup>1</sup> HUANG Wen-jing<sup>1</sup> WANG Zhan<sup>1,2</sup>秦先魁<sup>1,2</sup> 沈汪洋<sup>1,2</sup> 蔡乔宇<sup>1</sup>QIN Xian-kui<sup>1,2</sup> SHEN Wang-yang<sup>1,2</sup> CAI Qiao-yu<sup>1</sup>

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430000;

2. 大宗粮油精深加工省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430000)

(1. College of Food Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. Key Laboratory of the Deep Processing of Bulk Grain and Oil Authorized by Ministry of Authorized by Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430000, China)

**摘要:**文章对现有植物多酚提取研究中未提及的提取方法(如亚临界萃取、低共熔溶剂萃取、加压溶剂萃取等)进行了总结,深入分析了不同提取方法的原理和优缺点,并对植物多酚提取方法的发展方向进行了展望。

**关键词:**植物多酚;提取;亚临界萃取;低共熔溶剂萃取;加压溶剂萃取

**Abstract:** In this review, the non-mentioned extraction methods of plant polyphenol in the existing research are summarized, including subcritical extraction, low eutectic extraction, and pressurized extraction, etc. The principles, advantages and disadvantages of different extraction methods are deeply analyzed. Moreover, the development direction of plant polyphenol extraction is prospected.

**Keywords:** plant polyphenols; extraction; subcritical extraction; eutectic solvent extraction; pressurized liquid extraction

植物多酚对人体健康有许多积极作用,不同多酚的功能存在差异:原花青素具有很高的抗氧化能力<sup>[1]</sup>,单宁表现出极强的抗炎特性<sup>[2]</sup>,此外,多酚在抑菌、预防糖尿病和心血管疾病、抗癌细胞增殖<sup>[3-5]</sup>等方面均表现出很好的效果。植物多酚的这些功能使其具有作为保健品和药物的潜能。

**基金项目:**“十三五”重点研发计划(编号:2018YFD0401002-03);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(编号:LT201911)

**作者简介:**田富林,男,武汉轻工大学在读硕士研究生。

**通信作者:**黄文晶(1987—),男,武汉轻工大学讲师,博士。

E-mail: huangwenjinbest@163.com

**收稿日期:**2020-05-12

目前已有较多关于多酚提取的研究,文章拟对这些研究中未提及的提取方法(如亚临界萃取、低共熔溶剂萃取、加压溶剂萃取等)进行补充,对不同提取方法的作用原理和优缺点进行深入分析,并展望其未来发展方向,旨在为高效、绿色、安全的植物多酚提取方法的研究提供参考。

### 1 植物多酚的提取

传统的植物多酚提取方法是通过有机溶剂进行萃取,但该提取方法耗时长、提取率低、萃取剂消耗量大等,且有机溶剂的使用也限制了其在食品药品中的应用;此外,萃取过程中可能产生的降解产物也会影响其应用范围。随着科学技术的发展,许多先进的提取技术得到了开发和运用,如微波辅助提取、加压溶剂提取、超声辅助提取和超临界流体提取等,这些先进的提取技术可以较好地克服传统提取工艺的不足。

#### 1.1 固液萃取(SLE)

SLE是最常用的酚类萃取方法之一,利用各组分在溶剂中的不同溶解度进行酚类物质的提取,采用有机溶剂或有机溶剂的水溶液作为萃取剂,提取物中含有可溶性非酚类物质,产物较为粗糙,需对其进行纯化才能得到纯度较高的多酚。

多酚易与其他植物成分(如碳水化合物、蛋白质等)形成复合物,这对酚类物质在溶剂中的溶解度有较大影响,增大了其提取难度。Akowuah等<sup>[6]</sup>研究发现,采用极性不同的溶剂萃取猫须草多酚时,不同萃取剂所得提取物的组分和含量存在较大差异,表明不同种类的多酚在不同极性溶剂中的溶解度存在差异。说明萃取剂的选择

对 SLE 的得率有重要影响。目前,乙醇—水溶液是植物多酚提取常用的固液萃取剂。Ramón-Gonçalves 等<sup>[7]</sup>使用乙醇—水溶液作为萃取剂,对废咖啡渣中的多酚进行了萃取,经色谱法和化学计量学分析后确定了在废咖啡渣中提取多酚的最佳条件。

### 1.2 加压溶剂萃取(PLE)与加速溶剂萃取(ASE)

加压溶剂萃取(PLE)是在高压条件下提高溶剂沸点,利用高温溶剂对物质进行萃取。加速溶剂萃取也是加压溶剂萃取中的一种,其是在相对高温及高压条件下使溶剂保持液态形式,对物质进行静态萃取<sup>[8]</sup>。高温有利于促进待萃取物的溶解,能在较短时间内完成萃取<sup>[9]</sup>。Álvarez-Casas 等<sup>[10]</sup>发现,白葡萄渣多酚的最佳 PLE 条件为:以 63% 的甲醇为萃取剂,最佳提取温度为 105 °C,提取时间为 5 min。García-Jares 等<sup>[11]</sup>研究表明,白葡萄籽中酚类物质的最佳 PLE 条件为:以 65% 的甲醇为萃取剂,最佳提取温度为 105 °C,萃取时间为 2 h,此时不同品种白葡萄籽提取物中的总多酚含量为 99~121 mg 没食子酸当量/g 干重。Díaz-de-Cerio 等<sup>[12]</sup>建立了 PLE 与高效液相色谱串联四极杆飞行时间质谱联用的方法检测桃金娘叶中的酚类化合物,缩短了检测时间,进一步证明了 PLE 的高效性。曹会凯等<sup>[13]</sup>研究发现,在最优的 PLE 条件下,山楂黄酮的提取率可达 4.99%;而常压条件下的最大提取率只有 3.64%,且溶剂用量约为前者的 6~20 倍。

与 SLE 相比,PLE/ASE 溶剂消耗量小、耗时短,且对样品的处理过程较为简单,但该方法也存在较大的局限性,不适用于热不稳定多酚(如花青素、芦丁、单宁、没食子酸等)的提取<sup>[14]</sup>。

### 1.3 超临界流体萃取(SFE)

气液体系中,当流体的温度、压力超过一定区域时,气相与液相的界面会消失,形成单一的均相流体,称为超临界流体(SCF)<sup>[15]</sup>。由于 SCF 具有密度大、黏度小、扩散系数居中的特性,其可以作为有效的萃取剂<sup>[16]</sup>。与 PLE/ASE 不同的是,SFE 过程中,溶剂达到气液平衡点,其存在状态会发生改变。

最常用的 SCF 是超临界 CO<sub>2</sub>,乙烷、丁烷、戊烷、一氧化二氮、水等也常用作 SCF。超临界 CO<sub>2</sub> 的临界温度相对较低(为 31.1 °C),可在较低温度下完成多酚萃取,避免了高温对多酚结构的破坏。Lazzè 等<sup>[17]</sup>采用超临界 CO<sub>2</sub> 对葡萄皮、籽等废料中的多酚进行了提取,该多酚物质表现出很强的抗氧化和抗增殖活性,说明超临界 CO<sub>2</sub> 提取物可以保持较高的生物学活性。由于 CO<sub>2</sub> 是非极性化合物,可在 SCF 中加入第 3 组分增加极性多酚的溶解度,该组分被称为夹带剂。顾仁勇等<sup>[18]</sup>研究表明,与不使用夹带剂相比,以乙醇溶液为夹带剂提取的八月瓜幼果多酚得率提高了约 2.45 倍,产品纯度提高了约 15.49%,说明夹带剂对提高多酚得率有显著促进作用。刘迪等<sup>[19]</sup>研究

表明,核桃青皮多酚的最佳超临界二氧化碳提取工艺为:萃取温度 50 °C,萃取压力 30 MPa,萃取时间 6 h,乙醇体积分数 75%,夹带剂用量 3 mL/g,CO<sub>2</sub> 流量 30 kg/h;该条件下的提取量可达 8.83 mg/g;且提取物中含有丰富的单宁、芦丁、没食子酸等多酚物质。

CO<sub>2</sub> 是一种不活泼的气体,作为超临界流体,其在萃取过程中不会与待提取物发生化学反应,且无臭无毒,是一种安全性极好的提取载体,较为适合应用于食品药品领域。但 CO<sub>2</sub> 作为一种非极性化合物,限制了其在极性多酚提取方面的应用,需添加合适的夹带剂以增加极性多酚的溶解度。

### 1.4 亚临界水萃取(SWE)

亚临界流体萃取技术是一种应用亚临界流体来完成萃取的提取方法。溶剂在高于其沸点但低于其临界温度的温度区间内、在一定压力下以液态存在的状态称为溶剂的亚临界状态,在此状态下利用其相似相溶的物理性质,用作生物成分萃取的溶剂称为亚临界萃取溶剂<sup>[20]</sup>。

亚临界水具有一系列优点,被较多用作植物多酚的亚临界萃取剂。随着温度的升高,处于亚临界状态下的水极性发生改变,可以实现对植物中多酚的选择性提取。Moreira 等<sup>[21]</sup>研究发现,亚临界水萃取的葡萄藤蔓多酚对不同的细菌和酵母菌均有抑菌作用,该研究扩充了食品或制药行业天然抗氧化剂的来源。Luo 等<sup>[22]</sup>研究发现,高粱麸皮多酚的最佳 SWE 提取条件为提取温度 144.5 °C,提取时间 21 min,液料比 35:1 (mL/g),此时的多酚得率为(47.253±0.375) mg 没食子酸当量/g 麸皮干重,该方法提高了多酚提取速率,且由于多酚组分增加,提取率也有所提升。Cova 等<sup>[23]</sup>研究了 SWE 对菊苣多酚的提取效果,发现每公斤新鲜菊苣中多酚的回收率最高可达 3 g 没食子酸当量,仅耗时 15 min,而常规提取需 240 min 才能取得相同的结果,该研究进一步证明了 SWE 的高效性。

SWE 具有一定优越性,采用的萃取剂为水,廉价无污染,且对人体不会产生毒性,具有广阔的前景。与 PLE/ASE 不同的是,SWE 过程中的温度和压力并不是固定的,而是通过温度和压力的变化来改变水的极性,从而实现对非极性多酚的提取。但此过程中水的温度和压力变化较大,易造成对热不稳定多酚结构的破坏。Doctor 等<sup>[24]</sup>研究发现,香豆素在 100,150 °C 等较低温度下是稳定的,但在 200 °C 或更高温度下加热 60 min 后会发部分降解;扁豆多酚更易溶于温度更高的亚临界水。

### 1.5 膜分离技术(MST)

膜技术是一项新兴的用于澄清、分离和浓缩的绿色节能技术。其以选择性透过膜为分离介质,当膜两侧存在某种推动力(如压力差、浓度差、电位差等)时,原料侧组分选择性地透过膜,从而达到分离、提纯、浓缩等目

的<sup>[25]</sup>。平板型聚酰胺商业膜的截留分子量在超滤到纳滤范围内,Conidi等<sup>[26]</sup>使用平板型聚酰胺商业膜从澄清的橄榄研磨废渣水提物中回收酚类化合物,发现纳滤膜具有较高的渗透通量和较低的污染指数,且对生物活性物质的截留率也明显高于超滤膜;截留分子量在150~500 Da的膜对黄烷醇和羟基肉桂酸衍生物的截留率约为100%,对总多酚的截留率约为72%。Mieres-Castro等<sup>[27]</sup>在研究智利本土植物 *Gaultheria phillyreifolia* 和 *G. poeppigii* 果实中多酚的抗氧化活性时,为分离其中的花色苷,使用了膜色谱系统,结果显示花色苷被有效地保留在膜中,回收率为83.4%~113.0%。Cassano等<sup>[28]</sup>采用膜法对红酒糟水提物进行了澄清与分级,使用了NP010、NP030和MPF36 3种平板型商业膜分离其多酚,所选择的膜均对花色苷有较高的截留率(>93%),进一步验证了膜对花色苷的高截留率。这些研究可以证明MST是一种有效的多酚分离方法,在分离植物多酚中具有应用价值。另外,膜不会破坏多酚的结构,因此纳滤保留物具有较高的抗氧化活性,在食品添加剂和食品补充剂的生产中具有重要的实用价值。

通过选择截留不同分子量的膜,可以实现对植物多酚的提取和分离,且提取率较高,膜分离以压力差、浓度差等作为推动力,这些因素对多酚的结构影响甚微,因而不会降低其生物学活性。其绿色、无污染的特性也使其十分适用于食品药品加工。但膜的表面易被污染,导致性能下降;并且膜的稳定性、耐热性、耐溶剂性等能力有限,限制了其使用范围。单独的膜分离技术功能有限,比如无法实现分离物的干燥、无法实现同分异构体的分离,因而常与其他分离技术联用。并且膜的造价较高,会增加工业化生产成本。

### 1.6 低共熔溶剂法(DES)

低共熔现象又称低温共熔,是指将2种或2种以上固体物质进行混合,使其混合物的熔点发生下降的现象<sup>[29]</sup>。研究<sup>[30]</sup>表明,DES的极性范围广,对多种化合物,特别是难溶于水的化合物具有较高的增溶能力,对某些天然产物具有较高的萃取能力和稳定能力,已被广泛应用于食品行业的目标成分提取、分离和浓缩,包括酚类化合物、糖、蛋白质等<sup>[31]</sup>。

Lakka等<sup>[32]</sup>将L-乳酸/甘氨酸(质量比为5:1)组成的DES用于藏红花多酚的提取,在50~60℃的低温条件下即可完成萃取,所得提取物表现出极高的抗氧化性,可能是因为该温度下藏红花多酚的结构不会被破坏,保持了其生物活性。Pal等<sup>[33]</sup>分别使用氯化胆碱与蔗糖、尿素、山梨醇组成的DES对洋葱中的多酚进行提取,由氯化胆碱与尿素组成的低共熔溶剂体系对洋葱皮中总酚的提取效果最好,而其他两种DES体系的提取率相对较低,提取液中的主要黄酮类化合物为槲皮素、山奈酚和杨梅素。

DES不仅具有高提取率,耗时也更短,Yin等<sup>[34]</sup>应用DES结合组织破碎提取法对刺槐种子中4种主要黄酮类化合物进行了提取优化,再结合高效液相色谱分析发现,黄酮类化合物的分析仅需6 min。

DES具有低成本、低毒性、易制备、可再生、可生物降解<sup>[35]</sup>等优点,可以在较低的温度下实现高效提取,因此不会破坏多酚的活性,使其提取物保持较好的抗氧化等性能,可实现对热不稳定多酚的提取。但不同极性的多酚在不同DES中的溶解度不同,因此需根据不同的待提取物来选择适当的溶剂,这是未来发展该技术需要克服的困难。此外,该法也无法实现对分离物的干燥,故还需对其提取物进行后续处理。

### 1.7 浊点萃取法(CPE)

CPE是液-液萃取技术的一种,但不以挥发性有机溶剂作萃取剂,不会造成环境污染。该技术利用了非离子型表面活性剂胶束水溶液的增溶作用和“浊点”特性,通过改变试验条件(如温度)到达其浊点时引发相分离,从而将待测物质与基质进行分离,并达到一定程度的富集。

近年来,浊点萃取法已成功被应用于植物体多酚的提取。Sliwa等<sup>[36]</sup>使用非离子表面活性剂成功萃取了三叶鬼针草中的黄酮类物质,证明了CPE在多酚提取应用中的可行性,同时也在理论层面揭示了其作用原理。Lee等<sup>[37]</sup>使用非离子表面活性剂Genapol X-080提取五味子中的木脂素,并与甲醇提取进行了比较,发现前者耗时相对要长,但其得率约为后者的1.5倍,综合萃取剂的耗用量、环保性等因素,前者是一种更为理想的植物多酚提取方法。

利用表面活性剂对植物多酚进行萃取是一种具有广泛应用前景的技术,但目前所使用的大部分表面活性剂会导致细胞毒性。Milek等<sup>[38]</sup>使用表面活性剂(Triton X-100)和丙酮水溶液提取蒲公英花、叶中的多酚,并以免肾细胞系RK13为试验对象,评价了两种不同提取系统制备的提取物对活体的影响,结果表明,即使干燥的粗提取物中仅残留少量的表面活性化合物,也可能在细胞水平上产生毒性作用。这在一定程度上限制了表面活性剂在食品药品中的应用。

### 1.8 辅助提取技术

1.8.1 超声辅助提取(UAE) UAE是一种温和的提取技术,与传统提取方式相比,其效率更高、耗溶剂量较少。有学者<sup>[39-40]</sup>发现,超声可以通过破坏植物组织细胞壁、加快内含物的释放来增强提取效果。Herrera等<sup>[41]</sup>发现超声辅助提取的草莓酚类化合物效率明显高于传统浸提法,且大大缩短了提取时间(仅需90 s)。Arteaga-Crespo等<sup>[42]</sup>应用响应面分析法进行了超声辅助提取番石榴叶多酚的优化,最佳提取条件下的总多酚含量为(3.46±

0.17) g 没食子酸当量/100 g 干重;与普通溶剂萃取相比,经优化后的 UAE 提取效率大幅提升,耗时更少、产量更高。

作为一种快速提取技术,UAE 已在食品工业的各过程中进行了测试,由于其消耗的化石能源很少,且可以减少溶剂消耗,从而产生更纯净的产品和更高的产量<sup>[43]</sup>。但由于超声波可传递很强的能量,故其对人体存在一定的伤害,因此,在进行 UAE 时需做好一定的防护措施,或者与声源保持一定的距离。

1.8.2 微波辅助提取(MAE) 微波辅助提取技术是具有高性能的提取方法之一,被广泛应用于天然产物的提取,与传统提取方法相比,其具有时间短、效率高优点<sup>[44-45]</sup>。

MAE 与 UAE 的原理不同,前者通过促进溶剂渗入植物细胞壁内增加待提取物在溶剂中的溶解量<sup>[42]</sup>;后者则通过破坏植物细胞壁促进待提取物的释放,从而增加其溶解量。黄菊等<sup>[46]</sup>使用 MAE 对石榴皮中的黄酮类物质进行了提取优化,并对提取物进行了抗氧化活性测试,发现其提取物具有较强的抗氧化能力。

1.8.3 酶法辅助提取(EAE) 细胞壁内含有半纤维素、淀粉、果胶等多糖,除了植物细胞壁内的可溶性多酚外,还有一些结合在细胞壁上的多酚很难用传统的水溶剂提取方法进行提取,降低了常规提取技术的提取效率<sup>[47]</sup>。此外,部分多酚易与植物体中存在的蛋白质等物质发生络合反应,生成络合物,导致多酚提取率下降<sup>[48]</sup>。针对这些问题,学者尝试使用酶法辅助提取多酚,而酶法辅助提取过程中,各种碳水化合物水解酶、蛋白酶等是较为常用的酶。

相应的碳水化合物水解酶作用于植物细胞,从而破坏细胞壁的致密结构,引起细胞壁及细胞间质结构产生局部疏松、膨胀、崩溃等变化,有利于有效成分的浸出<sup>[49]</sup>。陈东方等<sup>[50]</sup>发现酶解处理后可显著增加燕麦全麦粉中总多酚含量,尤其是阿魏酸含量提高了 11~24 倍,且提取物的抗氧化能力显著增强。程拯良等<sup>[51]</sup>研究表明,浸渍处理和果胶酶协同作用,能够显著增加苹果酒总多酚含量和多酚组分,这是由于果胶酶能够催化绿原酸和根皮苷的降解,促进咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、儿茶素和根皮素等多酚类物质的生成。

蛋白酶可以通过分解蛋白质,减少多酚与蛋白质的结合,从而提高多酚含量。赵文净等<sup>[47]</sup>发现使用木瓜蛋白酶处理白茶浸提液后,可以显著提高白茶多酚浸出量。熊俐等<sup>[52]</sup>使用纤维素酶和蛋白酶对菜籽饼进行复合预处理,再以乙醇为溶剂浸提多酚,与非酶解法相比,双酶法对多酚的提取率提高了约 54.46%。

经酶预处理后,植物细胞壁被破坏,游离多酚含量增加,同时也更易浸出,大幅度提高了提取率。大部分酶是

蛋白质,因此不会对环境和人体健康造成威胁,是一种安全的提取技术。但酶的作用条件较为温和,因此,为了保证酶的活性,对酶处理过程中的条件(包括温度、pH 等)要求较为严格。

## 2 植物多酚提取方法的优缺点

SLE 是使用最为广泛的一种提取方法,但提取率较低,且以有机溶剂为萃取剂,存在多种弊端。而 PLE/ASE、SFE、SWE、DSE 及 CPE 也是一种溶剂萃取技术,但与传统的溶剂萃取有区别:① PLE/ASE 对溶剂进行了加温、加压处理,有利于多酚的溶解,对于提高其得率有显著效果。② SWE 对溶剂(水)进行了加温、加压处理,但该过程中的温度和压力是变化的,会导致水的极性发生改变,有利于不同组分多酚的浸出;而水的极性变化范围是有限的,因此并不能实现对所有多酚组分的有效提取,其提取率可能低于 PLE/ASE,但 SWE 是一种纯绿色的提取手段,其提取物具有较高的生物活性,在抗氧化等方面表现出优越的性能。③ SFE 使用超临界流体为萃取剂,与 PLE/ASE 和 SWE 的最大区别是,溶剂的状态会发生变化,采用超临界 CO<sub>2</sub> 作萃取剂时可实现低温萃取,解决 PLE/ASE 和 SWE 无法完成的热不稳定多酚的提取问题。④ DES 是一种混合溶剂,其极性范围广,可实现低温萃取,但 DES 的配比问题不易确定。⑤ CPE 是一种液液萃取技术,不以有机溶剂为萃取剂,对极性化合物和非极性化合物的分离有较好效果。⑥ MST 是利用膜的选择透过性分离植物多酚,与其他方法存在较大区别。⑦ UAE 和 MAE 都是利用物理手段促进多酚的溶解,但对于结合态多酚的提取无显著促进效果。⑧ EAE 可通过生化反应促进结合态多酚的游离化,有利于其溶解。

## 3 总结

目前,关于植物多酚的研究较多,但植物多酚组分的复杂性和结构的不稳定性为提取增加了难度。近年来,许多新型提取分离技术被应用于植物多酚的提取,但大多仅停留在实验室阶段,远达不到大规模生产应用的要求。工业化生产中,传统的提取分离工艺依然占据着主导地位。但是传统溶剂萃取法存在效率低、污染大、安全问题等诸多弊端。发展高效、绿色、安全的提取技术成为迫切需求。

因此,未来的研究重心应着重于以下两个方面:① 推动现有技术在实际生产中的应用,充分考虑各提取工艺的优缺点,对不同原料采取不同的提取方法,达到有效提取的目的,可以考虑多种提取方法联用(如 SFE 可以实现对热不稳定多酚的提取,SWE 可以实现对极性多酚的提取,理论上二者可以联用,但其实际效果还有待验证)。② 进一步开发新的提取和分离技术,逐步取代传统溶剂浸提,实现高效、绿色提取,保证提取物对人体安全无害。

## 参考文献

- [1] LI Tao, LI Qi-li, WU Wei-guo, et al. Lotus seed skin proanthocyanidin extract exhibits potent antioxidant property via activation of the Nrf2-ARE pathway[J]. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 2019, 51(1): 31-40.
- [2] BAZYLKO A, PIWOWARSKI J P, FILIPEK A, et al. In vitro antioxidant and anti-inflammatory activities of extracts from *Potentilla recta* and its main ellagitannin, agrimoniin[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2013, 149(1): 222-227.
- [3] 郑慧, 杨勇, 曾艺琼, 等. 不同方法提取荷花蜂花粉可溶性膳食纤维的多酚含量及对微生物生长的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 159-163, 236.
- [4] DAVIS D W, NAVALTA J W, MCGINNIS G R, et al. Effects of acute dietary polyphenols and post-meal physical activity on postprandial metabolism in adults with features of the metabolic syndrome[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1 120-1 143.
- [5] 蔡霄英, 龚茵茵. 食用花卉中的多酚类成分及生物活性研究进展[J]. *食品与机械*, 2018, 34(11): 178-182, 189.
- [6] AKOWUAH G A, ISMAIL Z, NORHAYATI I, et al. The effects of different extraction solvents of varying polarities on polyphenols of *Orthosiphon stamineus* and evaluation of the free radical-scavenging activity[J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(2): 311-317.
- [7] RAMÓN-GONÇALVES M, GÓMEZ-MEJÍA E, ROSALES-CONRADO N, et al. Extraction, identification and quantification of polyphenols from spent coffee grounds by chromatographic methods and chemometric analyses[J]. *Waste Management*, 2019, 96: 311-317.
- [8] KAUFMANN B, CHRISTEN P. Recent extraction techniques for natural products; Microwave-assisted extraction and pressurised solvent extraction[J]. *Phytochemical Analysis*, 2002, 13(2): 105-113.
- [9] 牟世芬, 刘勇建. 加速溶剂萃取的原理及应用[J]. *现代仪器科学*, 2001(3): 18-20.
- [10] ÁLVAREZ-CASAS M, GARCÍA-JARES C, LLOMPART M, et al. Effect of experimental parameters in the pressurized solvent extraction of polyphenolic compounds from white grape marc [J]. *Food Chemistry*, 2014, 157: 524-532.
- [11] GARCIA-JARES C, VAZQUEZ A, LAMAS J P, et al. Antioxidant white grape seed phenolics; Pressurized liquid extracts from different varieties[J]. *Antioxidants*, 2015, 4: 737-749.
- [12] DÍAZ-DE-CERIO E, ARRÁEZ-ROMÁN D, SEGURACARRETERO A, et al. Establishment of pressurized-liquid extraction by response surface methodology approach coupled to HPLC-DAD-TOF-MS for the determination of phenolic compounds of myrtle leaves [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2018, 410(15): 3 547-3 557.
- [13] 曹会凯, 杜彬, 王同坤, 等. 加压溶剂萃取法提取山楂中黄酮物质的工艺研究[J]. *核农学报*, 2013, 27(11): 1 709-1 716.
- [14] 矫馨瑶, 李恩惠, 王月华, 等. 蓝莓多酚稳定性及热降解动力学研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(1): 81-87.
- [15] 方立. 超临界萃取技术及其应用[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2009, 7(4): 34-36.
- [16] 任文鑫, 李甜甜, 王愚, 等. 超临界流体萃取分离技术概述[J]. *现代食品*, 2019(22): 162-163.
- [17] LAZZÈ M C, PIZZALA R, GUTIÉRREZ PECHARROMÁ F J, et al. Grape waste extract obtained by supercritical fluid extraction contains bioactive antioxidant molecules and induces antiproliferative effects in human colon adenocarcinoma cells[J]. *Journal of Medicinal Food*, 20019, 12(3): 561-568.
- [18] 顾仁勇, 杨万根, 余佶. 响应面优化超临界 CO<sub>2</sub> 萃取八月瓜幼果多酚工艺[J]. *食品科学*, 2015, 36(10): 76-80.
- [19] 刘迪, 宋晓宇, 李婧, 等. 超临界二氧化碳萃取核桃青皮多酚及其体内抗氧化性[J]. *食品工业*, 2019, 40(5): 144-148.
- [20] 杨志空, 韩伟. 亚临界萃取技术在天然产物提取中的应用[J]. *机电信息*, 2018, 542(45): 42-46.
- [21] MOREIRA M M, BARROSO M F, PORTO J V, et al. Potential of Portuguese vine shoot wastes as natural resources of bioactive compounds[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 831-842.
- [22] LUO Xiao-ping, CUI Jie-mei, ZHANG Hai-hui, et al. Subcritical water extraction of polyphenolic compounds from sorghum (*Sorghum bicolor* L.) bran and their biological activities[J]. *Food Chemistry*, 2018, 262: 14-20.
- [23] COVA C M, BOFFA L, PISTOCCHI M, et al. Technology and process design for phenols recovery from industrial Chicory (*Chicoriumintybus*) leftovers[J]. *Molecules*, 2019, 24(15): 2 681-2 694.
- [24] DOCTOR N, PARKER G, VANG K, et al. Stability and extraction of vanillin and coumarin under subcritical water conditions[J]. *Molecules*, 2020, 25(5): 1 061-1 069.
- [25] 张云飞, 田蒙奎, 许奎. 我国膜分离技术的发展现状[J]. *现代化工*, 2017, 37(4): 6-10.
- [26] CONIDI C, EGEEA-CORBACHO A, CASSANO A. A combination of aqueous extraction and polymeric membranes as a sustainable process for the recovery of polyphenols from olive mill solid wastes[J]. *Polymers*, 2019, 11(11): 1 868-1 884.
- [27] MIERES-CASTRO D, SCHMEDA-HIRSCHMANN G, THEODULOZ C. Antioxidant activity and the isolation of polyphenols and new iridoids from Chilean *Gaultheria phillyreifolia* and *G. poeppigii* berries [J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 167-179.
- [28] CASSANO A, BENTIVENGA A, CONIDI C, et al. Mem-

- brane-based clarification and fractionation of red wine lees aqueous extracts[J]. *Polymers*, 2019, 11(7): 1 089-1 104.
- [29] 侯翠玉, 王震, 任树行, 等. 低共熔溶剂在混合物分离中的应用[J]. *科学通报*, 2015, 60(26): 2 490-2 499.
- [30] BASAR A O, PRIETO C, DURAND E, et al. Encapsulation of  $\beta$ -carotene by emulsion electrospraying using deep eutectic solvents[J]. *Molecules*, 2020, 25(4): 981-992.
- [31] CHEN Jing-nan, LI Yun, WANG Xiao-ping, et al. Application of deep eutectic solvents in food analysis: A review[J]. *Molecules*, 2019, 24(24): 4 594-4 605.
- [32] LAKKA A, GRIGORAKIS S, KARAGEORGOU I, et al. Saffron processing wastes as a bioresource of high-value added compounds; Development of a Green extraction process for polyphenol recovery using a natural deep eutectic solvent[J]. *Antioxidants*, 2019, 8(12): 586-600.
- [33] PAL C B T, JADEJA G C. Deep eutectic solvent-based extraction of polyphenolic antioxidants from onion (*Allium cepa* L.) peel[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, DOI: 10.1002/jsfa.9395.
- [34] YIN Xing-shuo, ZHONG Zhang-feng, BIAN Guang-li, et al. Ultra-rapid, enhanced and eco-friendly extraction of four main flavonoids from the seeds of *Oroxylum indicum* by deep eutectic solvents combined with tissue-smashing extraction[J]. *Food Chemistry*, 2020, DOI: 10. 1016/j. foodchem. 2020.126555.
- [35] 郭武杰, 陈钢, 吴卫泽, 等. 低共熔溶剂特性及在分离过程中的应用[J]. *现代化工*, 2014, 34(4): 42-45.
- [36] SLIWA P, SLIWA K, SIKORA E, et al. Incorporation of bioflavonoids from *Bidens tripartite* into micelles of non-ionic surfactants-experimental and theoretical studies[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, DOI: 10. 1016/j. colsurfb. 2019.110553.
- [37] LEE K Y, SHIN Yong-jun, KIM D H, et al. Micelle-mediated extraction of dibenzocyclooctadiene lignans from *Schisandra chinensis* with analysis by high-performance liquid chromatography[J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2014, 52(7): 745-750.
- [38] MILEK M, MARCINÁKOVÁ D, LEGÁTH J. Polyphenols content, antioxidant activity, and cytotoxicity assessment of taraxacumofficinale extracts prepared through the micelle-mediated extraction method[J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1 025-1 038.
- [39] 吕平. 超微粉碎联合超声辅助萃取制备人参总皂苷的研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(16): 42-46.
- [40] 王鹏旭, 成传香, 马亚琴, 等. 超声声效应在果蔬酚类化合物提取中的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 338-347.
- [41] HERRERA M C, LUQUE DE CASTRO M D. Ultrasound-assisted extraction for the analysis of phenolic compounds in strawberries[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, 379: 1 106-1 112.
- [42] ARTEAGA-CRESPO Y, RADICE Y, BRAVO-SANCHEZ L R, et al. Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from *Ilex guayusa* Loes. leaves using response surface methodology[J]. *Heliyon*, 2020, DOI: 10. 1016/j. heliyon. 2019.e03043.
- [43] TALMACIU A I, VOLF I, POPA V I. A Comparative analysis of the 'green' techniques applied for polyphenols extraction from bioresources[J]. *Chemistry and Biodiversity*, 2015, 12(11): 1 635-1 651.
- [44] CHEE K K, WONG M K, LEE H K. Optimization of microwave-assisted solvent extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments using a microwave extraction system with high-performance liquid chromatography-fluorescence detection and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 1996, 723(2): 259-271.
- [45] 孙晨. 微波辅助提取食品有效成分研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2011(7): 5-7.
- [46] 黄菊, 何伟平, 董黎明, 等. 微波辅助提取石榴皮黄酮及抗氧化活性研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(6): 92-97.
- [47] NADAR S S, RAO P, RATHOD V K. Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: A review[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 309-330.
- [48] 赵文净, 刘祖锋. 木瓜蛋白酶对白茶浸提液中茶多酚含量的影响[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(21): 60-62.
- [49] 彭茹洁, 汪佳丹, 韩伟. 植物多酚提取、分离纯化及其分析方法的研究进展[J]. *机电信息*, 2016(14): 21-29.
- [50] 陈东方, 师俊玲, 胡新中. 纤维素酶水解处理提高燕麦全粉中总多酚含量与抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2016, 37(1): 56-62.
- [51] 程拯良, 黄佳, 戚一曼, 等. 果胶酶及浸渍处理对苹果酒多酚组分的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(7): 59-65.
- [52] 熊俐, 谷良富. 双酶法预处理对菜籽饼多酚提取的影响[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(2): 36-40.