

苦荞黄酮提取工艺研究进展

董玲¹,张凤菊¹,籍子涵²,李家漫²,赵驰¹,李琦²,阿木布哈³,黄巧莲¹,李治华^{1*}

(1. 四川省农业科学院农产品加工研究所(四川省农业科学院食物与营养健康研究所),四川成都610066;2. 四川师范大学生命科学学院,四川成都610101;3. 甘洛县教育体育和科学技术局,四川凉山616850)

摘要: 苦荞是一种独特的药食两用粮食作物,兼具营养和药用价值,具有抗氧化、抗高血压、降血糖等多种生理活性功能。前期研究发现,苦荞的生物活性功能与其富含的黄酮类物质相关,研究苦荞黄酮物质的高效提取方法对相关功能性研究及苦荞深加工具有重要意义。因此,对近年苦荞黄酮提取工艺的研究进展进行综述,总结常用的传统黄酮提取方法和新兴提取方法、提取溶剂、提取条件及其优缺点,为苦荞黄酮开发利用提供新思路。

关键词: 苦荞;黄酮;提取;绿色溶剂;天然低共熔溶剂;活性成分

Research Progress on Extraction Methods of Flavonoids from Tartary Buckwheat

DONG Ling¹, ZHANG Fengju¹, JI Zihan², LI Jiaman², ZHAO Chi¹, LI Qi², AMubuha³, HUANG Qiaolian¹, LI Zhihua^{1*}

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences (Institute of Food, Nutrition and Health, Sichuan Academy of Agricultural Sciences), Chengdu 610066, Sichuan, China; 2. College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, Sichuan, China; 3. Education, Sports, Science and Technology of Bureau, Ganluo County, Liangshan 616850, Sichuan, China)

Abstract: Tartary buckwheat is a distinctive dual-purpose crop with high nutritional and medicinal value, possessing a range of physiological functions, including antioxidant, antihypertensive, and hypoglycemic effects. Research has indicated that the bioactive properties of Tartary buckwheat are associated with its abundant flavonoid content. Investigating effective extraction techniques for flavonoids holds significant importance for functional research and the advanced processing of Tartary buckwheat. Therefore, this article reviewed recent research progress in the extraction techniques of flavonoids from Tartary buckwheat, summarizing commonly used traditional and emerging extraction methods, extraction solvents, extraction conditions, and their respective advantages and disadvantages, providing new insights and ideas for the development and utilization of Tartary buckwheat flavonoids.

Key words: Tartary buckwheat; flavonoids; extract; green solvents; natural deep eutectic solvents (NADEs); active component

引文格式:

董玲,张凤菊,籍子涵,等.苦荞黄酮提取工艺研究进展[J].食品研究与开发,2025,46(5):212-217.

DONG Ling, ZHANG Fengju, JI Zihan, et al. Research Progress on Extraction Methods of Flavonoids from Tartary Buckwheat[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 212-217.

苦荞学名鞑靼荞麦 [*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn], 是一种独特的药食两用粮食作物^[1-2]。在多种

医药书籍中有记载苦荞具有安神、调气血、润肠、通便、清热肿风痛、止咳、平喘、强心、减肥、美容、抗炎和抗过

基金项目:四川省科技计划项目(2022YFS0594)

作者简介:董玲(1986—),女(汉),助理研究员,硕士研究生,研究方向:农产品加工。

*通信作者:李治华(1982—),男(汉),研究员,博士,研究方向:农产品加工。

敏等功效^[3]。同时,研究表明苦荞具有抗氧化、抗疲劳、降血糖、抗高血压、抗阿尔茨海默病、降低胆固醇和保护肝脏等作用^[4]。黄酮类化合物是在植物中合成的一类重要多酚类次生代谢物,可以保护植物免受不利环境条件影响的有效抗氧化剂,因其抗氧化能力和清除自由基能力而对人体健康具有积极作用^[5-8]。黄酮化合物具有抗氧化活性、抗炎、抗病毒、抗突变、抗癌和调节细胞酶功能等生物活性功能^[8-9],被认为是药物和化妆品应用中不可缺少的成分^[10]。黄酮类化合物有一个共同的 C6-C3-C6 骨架(含氧吡喃环连接两个苯环),根据与苯环相连接的吡喃环碳原子位置、吡喃环氧化程度、不饱和程度等被分成黄酮醇、异黄酮、黄酮、查尔酮、黄烷酮和花青素等亚类^[5],其化学结构,尤其是羟基影响其生物活性和生物体利用率^[11]。

苦荞含有大量的黄酮类物质^[12],研究表明苦荞黄酮对人体有抗氧化、抗高血压、降血糖、降血脂及抗动脉粥样硬化等作用^[13],如芦丁是苦荞黄酮的主要成分,又名维生素 P 或芸香苷,是一种从苦荞中发现的生物类黄酮,具有抗氧化、抗肿瘤、保护细胞、神经和心血管等多种药理活性^[14-15];槲皮素又名栲精、槲皮黄素,是苦荞黄酮的主要成分之一,具有减轻胰岛素抵抗、降血糖等多种作用^[16]。尽管黄酮具有很多生物活性功能,但通常需要达到一定剂量才能实现,故提高黄酮的提取浓度和效率对苦荞黄酮开发具有重要意义。

黄酮的提取主要基于相似相容原理,根据黄酮的极性和溶解性选择提取溶剂,同时配合提取原料选择适宜的破碎方法,达到提取目的^[5]。目前,提取溶剂包括有机溶剂和新型绿色溶剂。提取技术有传统提取技术和新兴提取技术,传统提取技术容易执行,采用简单和低成本的设备,消耗溶剂量大,在常压和相对较高温度条件,费时更长,提取物产量高;新兴提取技术,是一种现代的、生态的提取技术,使用的设备更昂贵和复杂,通常在更高的压力或者温度下进行,但节约提取时间。传统提取技术包括浸渍提取法、热回流提取和索氏提取。新兴提取技术包括超声波辅助提取法、微波辅助提取法、加压液体萃取技术、超临界流体提取技术、酶法提取等。本文对苦荞黄酮的主要提取工艺进行综述,以期对苦荞黄酮开发利用提供参考。

1 提取溶剂

1.1 有机提取溶剂

苦荞黄酮传统的提取溶剂有乙醇、甲醇、丙酮及其与水的混合物等。由于黄酮与其他杂质的极性存在较大差异,可以选择极性不同的溶剂进行提取。有机溶剂会对环境造成一定的污染,因有机溶剂会挥发到空气中,污染空气。此外,有机溶剂会影响人体健康,因为有机溶剂是挥发性有机化合物,长期接触可能会对

人体造成损害,而乙醇提取工艺简单、对设备要求低、成本低、易挥发、重现性强、容易回收、污染较小、控制条件简单,因此乙醇是常用的大规模提取黄酮的提取溶剂^[17]。

1.2 新型绿色溶剂

传统提取溶剂存在能耗高、制备周期长、提取物中溶剂不易去除、对环境不友好等问题。随着人们对环境和健康的重视以及绿色化学的发展,许多新型绿色溶剂被研发应用,如离子液体、低共熔溶剂和天然低共熔溶剂。

1.2.1 离子液体

离子液体(ionic liquids, ILs)一般由有机阳离子和有机或者无机阴离子构成,在低于 100 °C 条件下呈现液态的有机盐,具有化学稳定性高、绿色环保、溶剂可回收、不易燃烧等优点,缺点是生物降解性差。Feng 等^[18]利用离子液体([C₄mim]Br)进行苦荞黄酮提取,黄酮含量达到 41.17 mg/g,提取效率和抗氧化活性均优于传统溶剂。

1.2.2 低共熔溶剂

低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DES)是一种或多种氢键供体和氢键受体相互作用形成的新型提取溶剂,由氯化胆碱、季铵盐和氢键供体(如尿素、羧酸等)结合而成,具有性质稳定、易生物降解、低挥发性、高热稳定性、能耗低、合成简单等优点。由于低共熔溶剂在天然植物提取和分离方面具有独特优势,已广泛用于中药黄酮类物质提取^[19-20]。雷永伟等^[21]通过响应面设计研究低共熔溶剂提取苦荞黄酮最优条件,筛选到以氯化胆碱/尿素(物质的量比 1:2)为基本结构单元的低共熔溶剂是提取荞麦壳黄酮最佳溶剂,其提取率高于 60% 乙醇,最优提取条件为温度 70 °C、低共熔溶剂含水量 35%、液料比 52:1 (mL/g)、时间 2.8 h,荞麦壳黄酮提取率为 4.79%。

1.2.3 天然低共熔溶剂

天然低共熔溶剂(natural deep eutectic solvents, NADES)由构成细胞的主要成分(如糖、醇类、氨基酸、有机酸和胆碱衍生物等)形成,也是通过氢键结合形成的低熔点液体。在室温下呈现液态的共晶体系,被认为是细胞中的第三类溶剂,具有良好的生物降解性和天然产物溶解性^[22-23]。与离子液体和低共熔溶剂相比,天然低共熔溶剂的提取效率、提取物稳定性和活性都有提高,是一种更安全环保的新型绿色提取溶剂,在食品和药品等领域具有很广阔的应用前景^[24]。由于天然低共熔溶剂基本结构单元取决于主要组成成分的分子相互作用,所以在应用时需考虑水分含量、温度和成分比例对提取效率的影响^[23]。Huang 等^[25]用超声波辅助结合天然低共熔溶剂进行苦荞皮黄酮提取,研究结果证实天然低共熔溶剂基本结构单元和水分含量对黄

酮提取率有很大影响,13种天然低共熔溶剂中,以氯化胆碱和甘油为基本结构单元的提取率最高(6.5 mg/g),添加20%水后其提取率得到显著提高(9.6 mg/g),与80%甲醇溶液相比,提取优势明显。

2 提取技术

2.1 传统提取技术

2.1.1 浸渍提取法

浸渍是一种简单的提取方法,将被提取原料浸泡在相应提取溶剂中,在这个过程中搅拌,溶剂软化并破坏植物的细胞壁,黄酮类物质溶解在提取溶剂中,通过过滤和压榨获得提取液。浸渍提取适宜在密闭容器中进行,以减少提取溶剂损失,同时结合真空蒸发对提取物进行浓缩。此技术的优点是设备简单,易操作;缺点是提取效率低,耗时长^[26]。此外,根据提取目标物的溶解性质选择合适的溶剂至关重要,常用的浸提溶剂是热水和乙醇。由于大多数黄酮化合物不溶于水,热水浸提法仅适合提取溶于水的黄酮苷类物质,例如芦丁。热水浸提法简单易行,该方法以水为提取溶剂,具有对环境无毒、无害、对设备要求不高、成本低等优点。但热水浸提法提取黄酮物质的提取率较低,并且提取物中含有大量杂质,不适用于对产物纯度要求高的生产。李静舒^[27]研究发现,热水浸提法的总黄酮得率比较低,乙醇浸提得率是热水浸提的2倍。

2.1.2 热回流提取

热回流提取以回流提取设备作为主反应器,对溶剂和物料进行加热,提高溶剂和物料之间的传质和接触效率,同时溶剂蒸汽冷凝返回与物料混合,实现继续提取和提取温度控制,减少溶剂损失。热回流提取比热水浸提需要的提取时间更短、溶剂用量更少,但它不能用于提取不耐热的天然产物^[28-29]。Liu等^[30]采用75%乙醇作为溶剂对苦荞黄酮进行回流提取,经过浓缩后黄酮含量为60%,经过进一步反溶剂重结晶,黄酮含量达到99.81%。Zhang等^[31]采用乙醇作为溶剂进行苦荞黄酮回流提取工艺优化,在乙醇浓度75%、提取时间60 min、料液比1:40(g/mL)时提取效果最好,黄酮提取率为(9.011±0.029)%。

2.1.3 索氏提取

索氏提取时,用过滤套将物料包裹起来,放在萃取器中,提取溶剂放在设备底部,经过加热沸腾,溶剂变成蒸汽上升,在上升过程被冷凝再次滴入萃取器,当液面超过虹吸管最高处时,发生虹吸现象,溶液回流入设备底部,利用回流和虹吸原理,实现用新鲜溶剂连续提取物料,其综合了回流提取和渗滤的优点。索氏提取与浸渍提取法和热回流提取法相比,所需时间和溶剂消耗更少,具有自动连续高效提取的优点,因此成为最广泛使用的天然产物提取工艺。当使用索氏提取时,

需要考虑提取目标物的热稳定性,因高温和长时间提取会增加热降解的可能性^[28-29]。李朋等^[32]采用正交试验对索氏提取苦荞黄酮工艺进行优化,结果表明,乙醇浓度75%、料液比1:35(g/mL)、提取温度75℃、提取时间4 h条件下,提取率最高(1.46%),对黄酮提取率影响依次是乙醇浓度>提取时间>提取温度>料液比。米智等^[33]通过正交试验对索氏提取法提取苦荞中黄酮类化合物工艺优化,得出最佳提取工艺:乙醇与苦荞液料比为7:1(mL/g)、提取3次、乙醇浓度80%和回流时间1.5 h。

2.2 新兴提取技术

2.2.1 酶法提取

因为受到细胞壁中纤维素的阻碍,传统水提法的总黄酮得率比较低。纤维素酶作用于以纤维素为主要成分的细胞壁,改变了细胞壁的通透性,从而提高了有效成分的得率。对苦荞茎叶而言,纤维素酶可以破坏苦荞茎叶的细胞壁结构,使黄酮类成分易于溶出,提高提取率。王敏等^[34]利用纤维素酶处理苦荞茎叶粉然后采用水提取法提取黄酮,通过单因素试验以及正交试验得到酶法提取的最佳工艺条件:酶解温度为55℃、加酶量为3.0 μL、pH值为6.5、酶解时间90 min,之后在90℃条件下,用水提取3次,每次持续30 min。提取效果受各因素影响的主次顺序为酶解温度>酶解时间>加酶量。采用纤维素酶酶法提取的总黄酮得率达到了水提法的3.08倍。可见酶法提取适用于苦荞中黄酮类化合物的辅助提取,能够大大增加苦荞黄酮的得率。

2.2.2 超声波辅助提取法

超声波辅助提取(ultrasound-assisted extraction, UAE)是一种新型的绿色化学提取技术,利用超声具有很强的空化作用、力学作用和激活作用,使苦荞的细胞壁快速破裂,同时改善颗粒度分布,提高溶剂渗透能力,降低萃取过程的传质阻力,加快黄酮类物质的释放,从而提高提取效率并保持活性成分的完整性。超声提取具有可以使用水和低共熔溶剂等环保溶剂代替有机试剂、提取温度较低、渗透能力强等优点。王斯慧等^[35]进行了超声波辅助乙醇试验,结果显示:该工艺可有效地提高提取总黄酮类成分的质量和二次萃取得率,相对于常规的有机溶剂浸出法,超声浸出法能有效地降低提取温度并缩短提取时间。孟晶晶等^[36]采用Box-Behnken试验设计,选择提取时间、料液比、提取温度与超声频率进行响应面试验,对超声波辅助提取荞麦总黄酮工艺进行优化得出最优提取工艺:以70%的乙醇溶液作为提取溶剂,料液比1:50(g/mL),提取时间为86 min,提取温度为85℃和超声频率为72 kHz,在该条件下得到的理论总黄酮得率为4.92%,与实际测量结果4.94%符合程度较高。

2.2.3 微波辅助提取法

微波辅助提取(microwave-assisted extraction, MAE)技术是一种新的萃取技术,具有均一性好、反应效率高、选择性好、操作简便、副产物少、萃取得率高等优点。微波是一种非电离电磁波,频率为 $3\times 10^8\sim 3\times 10^{11}$ Hz。微波辅助提取是基于电磁波可以直接渗入到细胞内部,胞内物质吸收电磁能,迅速转化成热量,使胞内温度骤然上升,导致产生较大的压力,在这种情况下,细胞壁会因为承受不住压力而破碎,从而释放出更多的物质,然后被环境中的溶剂溶解。除了微波产生的热效应,微波产生的电磁辐射对溶剂和提取成分的振动作用,也对提高黄酮的提取率起到了促进作用。因此,在进行微波提取工艺研究时,要综合考虑提取温度、提取时间、微波频率、物料和溶剂的电介质磁化率等因素^[26]。李富兰等^[37]以提高萃取得率为目的,对苦荞茶树中的黄酮进行了研究,将70%的酒精溶液加入到以1:20(g/mL)的料液比配制的苦荞溶液中,微波功率300 W,萃取时间3 min,在这个最优组合条件下,黄酮的萃取率可以达到4.13%。梁琥等^[38]采用微波萃取和常规回流萃取相结合的方法,在800℃的水浴中对苦荞种子样品进行预处理,采用响应曲面法对其进行了优化,得到的总黄酮含量为5.02%。

2.2.4 超临界流体提取技术

超临界流体提取(supercritical fluid extraction, SFE)技术是一种应用于天然产物提取领域的新型绿色萃取技术,这个技术可以有效地提高苦荞中黄酮类化合物的提取效率和纯度。二氧化碳是一种常用的超临界流体提取介质,其对环境无害、价格低廉、无色无味、易于获取且可重复利用,因此,超临界二氧化碳萃取技术已成为苦荞中黄酮类化合物提取的一个重要方法。在使用该技术时,需严格考虑温度、压力、样品体积、溶剂添加、流速控制等重要条件^[29],对设备要求比较高。郭月英^[39]对苦荞麦壳中的苦荞总黄酮进行了超临界二氧化碳萃取,试验得到最佳工艺条件为以乙醇为包裹剂、25 MPa的控制压力、1:10(g/mL)的料液比、35℃的条件下,提取4 h。谭光迅等^[40]研究表明,在提取过程中,压力、温度对提取效果有很大的影响,如能在提取之前保持一定的压力,则可将提取到的苦荞总黄酮含量提高约33.33%。

2.2.5 亚临界水提取技术

亚临界水是指让压力高于给定温度下水的蒸气压,使水体在100~374℃范围内仍保持液体状态的水,即高于沸点和低于临界点的水^[41-42]。在亚临界状态下,调整温度和压力可以改变水的介电常数、密度、黏度、扩散率、表面张力等性质^[41]。随着温度的变化,水的极性发生显著变化,例如分别在200、250、300℃条件下,亚临界水的介电常数分别相当于乙腈、甲醇和乙

醇的介电常数^[42],使亚临界水具有类似于乙腈、甲醇和乙醇的极性,这一特性使亚临界水成为一种绿色提取液。亚临界水提取(subcritical water extraction, SBWE)的提取效率受温度和压力的影响,因此在用此方法时需根据生产需求对其进行优化。它的提取优点是安全无毒、不污染环境、经济,同时可根据被提取目标物极性,通过温度调节提取液密度、离子产物和介电常数,使其达到最适提取效果;缺点是对设备要求高、提取压力和温度不易精准控制、高温状态下有些不耐热,黄酮可能会存在降解^[42]。Dzah等^[43]分别用超声波辅助提取、亚临界水萃取和超声波辅助亚临界水提取技术对苦荞进行多酚提取,提取物总酚含量排序为亚临界水萃取(53.3 mg/g)>超声波辅助亚临界水(31.8 mg/g)>超声波辅助提取(19.3 mg/g);亚临界水萃取物的抗氧化能力最强、对肝癌细胞的毒力活性最强,对提取物质进行液相色谱质谱联用(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)分析,分别鉴定到14、8种和7种黄酮类物质。以上结果表明,亚临界水萃取技术是一种很有应用前景的苦荞黄酮提取方法。

2.2.6 加压液体萃取技术

加压液体萃取(pressurized liquid extraction, PLE)又称加速溶剂萃取、增强溶剂萃取、加压流体萃取、加速流体萃取和高压溶剂萃取^[28],是一种将高温和高压相结合的绿色萃取过程,通过将封闭系统中的压力和温度提升,通常在50~300℃和3.5~20 MPa之间,破坏细胞和组织结构,并将目标成分快速、大量地溶解到萃取溶剂中,从而实现高效萃取的技术^[44-45]。与其他方法相比,加压液体萃取技术显著缩短了提取时间、降低了溶剂的消耗,并具有良好的重复性。加压液体萃取的溶剂有水、乙醇、离子液体和共熔溶剂等^[45],这些溶剂易回收、安全性高、对环境友好。目前加压液体萃取已成功应用到中药天然产物提取,包括皂苷、黄酮类化合物和精油等。然而,本技术的缺点是提取需在高温高压条件下进行,因此在使用此方法时需充分考虑被提取目标物的稳定性,对溶剂类型、添加量、压力、温度和提取时间等条件进行系统优化^[5, 44, 46]。Kraujaliene等^[47]分别使用水、乙醇水溶液和丙酮作溶剂,在70℃和140℃条件下对苦荞花进行加压液体萃取,经超高效液相色谱-电喷雾离子源-四极杆飞行时间质谱联用(ultra performance liquid chromatography - electrospray ionization - quadrupole time of flight - mass spectrometry, UPLC/ESI-QTOF-MS)鉴定和高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)定量分析,萃取物主要成分是芦丁和槲皮素。萃取温度和溶剂对产物组成和提取率有很大影响,在140℃条件下提取产率和总抗氧化能力高于70℃,证明短时间在高温下更有利于提取;在140℃条件下,乙醇水溶液和水对芦丁提

取率基本无差异,在70℃条件下,乙醇水溶液和丙酮作为溶剂提取的芦丁含量高于以水为溶剂。

3 结语

提取是研究和开发黄酮功能性物质的一个重要步骤,改进和开发更高效、更低成本和环境友好的提取技术是研究的热点。新技术(例如超临界流体法、加压液体萃取和微波辅助提取)已取得了大量的研究成果,并且广泛应用于苦荞黄酮的提取,这些成果有助于提高苦荞黄酮工业生产的产率以及效率。但由于样品基质的复杂性和黄酮类化合物化学特性的多样性,目前还没有针对每种材料或黄酮类化合物提取的单一标准方法,同时对黄酮提取物的生物活性研究还非常有限,提取条件优化除了要充分考虑苦荞黄酮极性性质、热稳定性、提取量和设备等实际生产需要,还需结合提取物的生物功能,选择绿色低碳的提取技术。

参考文献:

- [1] RUAN J J, ZHOU Y X, YAN J, et al. Tartary buckwheat: An underutilized edible and medicinal herb for food and nutritional security[J]. Food Reviews International, 2022, 38(4): 440-454.
- [2] LI H Y, LV Q Y, MA C, et al. Metabolite profiling and transcriptome analyses provide insights into the flavonoid biosynthesis in the developing seed of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(40): 11262-11276.
- [3] 王婧宜, 金越, 郭慧青, 等. 苦荞的营养保健功能及其在航天食品中的应用展望[J]. 食品安全导刊, 2019(6): 176-179, 184. WANG Jingyi, JIN Yue, GUO Huiqing, et al. Nutrition and health care function of Tartary buckwheat and its application prospect in aerospace food[J]. China Food Safety Magazine, 2019(6): 176-179, 184.
- [4] ZHU F. Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 231-245.
- [5] CHAVES J O, DE SOUZA M C, DA SILVA L C, et al. Extraction of flavonoids from natural sources using modern techniques[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 507887.
- [6] LEI Z T, SUMNER B W, BHATIA A, et al. UHPLC-MS analyses of plant flavonoids[J]. Current Protocols in Plant Biology, 2019, 4(1): e20085.
- [7] ROY A, KHAN A, AHMAD I, et al. Flavonoids a bioactive compound from medicinal plants and its therapeutic applications[J]. BioMed Research International, 2022: 5445291.
- [8] ARORA V, SHARMA N, TARIQUE M, et al. An overview of flavonoids: A diverse group of bioactive phytoconstituents[J]. Current Traditional Medicine, 2023, 9(3): 1-12.
- [9] RAKHA A, UMAR N, RABAIL R, et al. Anti-inflammatory and anti-allergic potential of dietary flavonoids: A review[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2022, 156: 113945.
- [10] PANCHE A N, DIWAN A D, CHANDRA S R. Flavonoids: An overview[J]. Journal of Nutritional Science, 2016, 5: e47.
- [11] DIAS M C, PINTO D C G A, SILVA A M S. Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity[J]. Molecules, 2021, 26(17): 5377.
- [12] HUDA M N, LU S, JAHAN T, et al. Treasure from garden: Bioactive compounds of buckwheat[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127653.
- [13] ZOU L, WU D T, REN G X, et al. Bioactive compounds, health benefits, and industrial applications of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(5): 657-673.
- [14] GANESH PURKAR A, SALUJA A K. The pharmacological potential of rutin[J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2017, 25(2): 149-164.
- [15] IMANI A, MALEKI N, BOHLOULI S, et al. Molecular mechanisms of anticancer effect of rutin[J]. Phytotherapy Research, 2021, 35(5): 2500-2513.
- [16] 李金娣. 儿茶素等几种类黄酮氧化前后的抗氧化活性分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2012. LI Jindi. Analysis of antioxidant activity of several flavonoids such as catechin before and after oxidation[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2012.
- [17] CUI J, DUAN X Q, KE L T, et al. Extraction, purification, structural character and biological properties of propolis flavonoids: A review[J]. Fitoterapia, 2022, 157: 105106.
- [18] FENG X T, CAO Y, QIN Y T, et al. Triphase dynamic extraction system involved with ionic liquid and deep eutectic solvent for various bioactive constituents from Tartary buckwheat simultaneously[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134955.
- [19] 于秋菊, 孙科, 耿凤英. 超声辅助低共熔溶剂提取桑黄多糖及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5): 81-88, 105. YU Qiuju, SUN Ke, GENG Fengying. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent-based extraction of polysaccharides from *Phellinus igniarius* and its antioxidant activities[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 81-88, 105.
- [20] 郝翠, 翟立海, 陈立宗, 等. 新型绿色溶剂在天然产物提取中的应用研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 464-470. HAO Cui, ZHAI Lihai, CHEN Lizong, et al. Application of new green solvents in extraction of natural products[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2020, 46(5): 464-470.
- [21] 雷永伟, 刘欣, 安艳霞, 等. 低共熔溶剂提取荞麦壳黄酮的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(13): 160-166. LEI Yongwei, LIU Xin, AN Yanxia, et al. Optimization of extraction technology of buckwheat hull flavonoids in deep eutectic solvent[J]. Food Research and Development, 2023, 44(13): 160-166.
- [22] 张艺欣, 邬旭然, 何若菡, 等. 天然低共熔溶剂萃取酚类物质研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 212-216, 240. ZHANG Yixin, WU Xuran, HE Ruohan, et al. Research progress on extraction of phenols with natural deep eutectic solvent[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 212-216, 240.
- [23] LIU Y, FRIESEN J B, MCALPINE J B, et al. Natural deep eutectic solvents: Properties, applications, and perspectives[J]. Journal of Natural Products, 2018, 81(3): 679-690.
- [24] 赵金荣, 李宝鑫, 薛晓霞, 等. 新型绿色溶剂在中药提取中的应用概述[J]. 药学研究, 2023, 42(2): 130-135. ZHAO Jinrong, LI Baoxin, XUE Xiaoxia, et al. Overview of the application of new green solvents in the extraction of traditional Chinese medicines[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2023, 42(2): 130-135.
- [25] HUANG Y, FENG F, JIANG J, et al. Green and efficient extraction of rutin from Tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1400-1405.
- [26] BITWELL C, INDRA S S, LUKE C, et al. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants[J]. Scientific African, 2023,

- 19: e01585.
- [27] 李静舒. 苦荞总黄酮提取工艺的比较研究[J]. 山西广播电视大学学报, 2013, 18(4): 22-24.
LI Jingshu. Comparative study on four extraction methods of total flavonoids from Tartary buckwheat[J]. Journal of Shanxi Radio & TV University, 2013, 18(4): 22-24.
- [28] ZHANG Q W, LIN L G, YE W C. Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review[J]. Chinese Medicine, 2018, 13: 20.
- [29] SRIDHAR A, PONNUCHAMY M, KUMAR P S, et al. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(4): 3409-3443.
- [30] LIU Y J, SUI X Y, ZHAO X H, et al. Antioxidative activity evaluation of high purity and micronized Tartary buckwheat flavonoids prepared by antisolvent recrystallization[J]. Foods, 2022, 11(9): 1346.
- [31] ZHANG J M, WANG D, WU Y H, et al. Lipid-polymer hybrid nanoparticles for oral delivery of Tartary buckwheat flavonoids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(19): 4923-4932.
- [32] 李朋, 刘军, 郝瑞英, 等. 索氏提取法提取苦荞麦粒黄酮的工艺优化[J]. 现代农业科技, 2016(12): 283-284, 286.
LI Peng, LIU Jun, HAO Ruiying, et al. Study on extraction technology of flavones from Tartary buckwheat by soxhlet extraction[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(12): 283-284, 286.
- [33] 米智, 刘荔贞, 武晓红, 等. 正交试验优化苦荞黄酮提取工艺[J]. 中国调味品, 2019, 44(11): 116-119.
MI Zhi, LIU Lizhen, WU Xiaohong, et al. Optimization of extraction process of flavonoids from Tartary buckwheat by orthogonal test[J]. China Condiment, 2019, 44(11): 116-119.
- [34] 王敏, 高锦明, 王军, 等. 苦荞茎叶粉中总黄酮酶法提取工艺研究[J]. 中草药, 2006, 37(11): 1645-1648.
WANG Min, GAO Jinming, WANG Jun, et al. Extracting technology of total flavones in powder of *Fagopyrum tataricum* stem and leaf by enzymatic treatment[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2006, 37(11): 1645-1648.
- [35] 王斯慧, 黄琬凌, 李馨倩, 等. 超声辅助提取苦荞黄酮的工艺优化[J]. 粮食与饲料工业, 2012(1): 28-31, 34.
WANG Sihui, HUANG Wanling, LI Xinqian, et al. Research on ultrasonic-assisted extraction technology of buckwheat flavonoids[J]. Cereal & Feed Industry, 2012(1): 28-31, 34.
- [36] 孟晶晶, 张志威, 周文喜, 等. 超声辅助提取荞麦总黄酮工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(4): 82-88.
MENG Jingjing, ZHANG Zhiwei, ZHOU Wenxi, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction technology of total flavonoids from buckwheat and its antioxidant activity *in vitro*[J]. Food Research and Development, 2022, 43(4): 82-88.
- [37] 李富兰, 梁晓锋, 李艳清. 微波法提取苦荞茶中黄酮的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(16): 119-121.
LI Fulan, LIANG Xiaofeng, LI Yanqing. Study on technology of extracting flavones of buckwheat by microwave[J]. Food Research and Development, 2015, 36(16): 119-121.
- [38] 梁斌, 何秀玲, 王一超, 等. 响应曲面法优化苦荞籽总黄酮微波辅助法提取工艺[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(11): 34-38.
LIANG Xiao, HE Xiuling, WANG Yichao, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for total flavonoids from Tartary buckwheat seeds using response surface methodology[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2014(11): 34-38.
- [39] 郭月英. 苦荞壳中黄酮类化合物提取的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
GUO Yueying. Study on extracting flavonoids from buckwheat hulls[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004.
- [40] 谭光迅, 李净. 苦荞黄酮的超临界二氧化碳萃取[J]. 酿酒, 2017, 44(1): 43-46.
TAN Guangxun, LI Jing. Supercritical carbon dioxide extraction of flavonoids from Tartary buckwheat[J]. Liquor Making, 2017, 44(1): 43-46.
- [41] 杨冰洁, 张雨, 赵婧, 等. 亚临界水萃取、改性多糖的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 492-499.
YANG Bingjie, ZHANG Yu, ZHAO Jing, et al. Research progress on extraction and modification of polysaccharide by subcritical water[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 492-499.
- [42] CHENG Y, XUE F M, YU S, et al. Subcritical water extraction of natural products[J]. Molecules, 2021, 26(13): 4004.
- [43] DZAH C S, DUAN Y Q, ZHANG H H, et al. Ultrasound-, subcritical water- and ultrasound assisted subcritical water-derived Tartary buckwheat polyphenols show superior antioxidant activity and cytotoxicity in human liver carcinoma cells[J]. Food Research International, 2020, 137: 109598.
- [44] RODRÍGUEZ DE LUNA S L, RAMÍREZ-GARZA R E, SERNA SALDÍVAR S O. Environmentally friendly methods for flavonoid extraction from plant material: Impact of their operating conditions on yield and antioxidant properties[J]. The Scientific World Journal, 2020: 6792069.
- [45] PEREZ-VAZQUEZ A, CARPENA M, BARCIELA P, et al. Pressurized liquid extraction for the recovery of bioactive compounds from seaweeds for food industry application: A review[J]. Antioxidants, 2023, 12(3): 612.
- [46] GULLÓN B, LÚ-CHAU T A, MOREIRA M T, et al. Rutin: A review on extraction, identification and purification methods, biological activities and approaches to enhance its bioavailability[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 220-235.
- [47] KRAUJALIENĖ V, PUKALSKAS A, VENSKUTONIS P R. Multi-stage recovery of phytochemicals from buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) flowers by supercritical fluid and pressurized liquid extraction methods[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 107: 271-280.

加工编辑:王雪

收稿日期:2023-12-16