

低共熔溶剂在食用菌多糖提取中的应用研究进展

裴龙英^{1,2} 刘 伟^{1,2} 王思丹³ 王晓雨^{1,2} 周雨亭^{1,2} 谢超颖^{1,2}

(1. 新疆理工学院食品科学与工程学院, 新疆 阿克苏 843000; 2. 新疆黑木耳工程技术研究中心, 新疆 阿克苏 843000; 3. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆 乌鲁木齐 840000)

摘要: 食用菌中含有的多糖具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤、调节肠道菌群等生物活性。低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)提取作为一种新型的多糖提取方法备受关注。文章概述了 DES 的组成、合成方法和重要性质, 对国内外基于 DES 提取食用菌多糖的研究进行了总结论述, 并进一步讨论了 DES 提取法存在的局限性。

关键词: 低共熔溶剂; 溶剂性质; 溶剂合成; 食用菌多糖; 多糖提取

Research progress on deep eutectic solvents in extraction of polysaccharides from edible mushrooms

PEI Longying^{1,2} LIU Wei^{1,2} WANG Sidan³ WANG Xiaoyu^{1,2} ZHOU Yuting^{1,2} XIE Chaoying^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu, Xinjiang 843000, China;
2. Xinjiang Black Fungus Engineering and Technology Research Center, Aksu, Xinjiang 843000, China;
3. College of Food Science and Medicine, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 840000, China)

Abstract: Polysaccharides in edible mushrooms possess biological activities such as immunomodulation, antioxidant effects, anticancer properties, and regulation of intestinal microbiota. Deep eutectic solvent (DES) extraction has gained attention as a novel method for polysaccharide extraction. This article outlines the composition, synthesis methods, and important properties of DES, summarizes and discusses research on polysaccharide extraction from edible mushrooms using DES in China and abroad, and further explores the limitations of the DES extraction method.

Keywords: deep eutectic solvent; solvent property; solvent synthesis; edible mushroom polysaccharides; polysaccharide extraction

食用菌因其极高的营养价值和鲜美的口感,已被种植、食用了数千年,除了具有丰富的营养价值外,还具有极高的药用价值。其中,食用菌中的多糖、蛋白质、饱和脂肪酸、酚类和萜类化合物都具有显著的生物活性^[1]。多糖是一类天然高分子化合物,具有抗氧化、抗肿瘤、抗衰老、抗炎症、降血脂、抗疲劳、调节免疫、促进机体代谢和缓解肥胖等作用^[2],被广泛应用于食品、医药等领域。食用菌多糖含量通常较低,传统的溶剂提取法操作复杂且提取率低,还伴随着较高的能耗。此外,传统的方法主要利用水和有机溶剂(如甲醇、乙醇等)提取分离,虽然也表

现出较好的提取效果,但大多数有机溶剂具有挥发性、高易燃性、毒性和不可降解的缺点,长期大量使用会带来不可避免的排放,对环境造成一定污染。

低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)为 Abbott 等^[3]发现的一种溶剂体系,近年来被广泛应用于天然产物特别是多糖的提取中,是一种具有优良性质的新型提取溶剂。DES 是由两个或两个以上的组分作为氢键受体(BHA)或氢键供体(BHD)合成制得^[4],由于大部分 DES 与离子液体(IL)在性质上十分相似,也被称为 IL 的类似物,与传统的 IL 相比,由季铵盐类物质(BHA)衍生的大量

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(编号:ZYD2022C03);新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(编号:2024D01C271);新疆理工学院校级项目(编号:ZY202405)

通信作者: 刘伟(1999—),男,新疆理工学院助教,硕士。E-mail:lw520233831xx@163.com

收稿日期: 2024-09-05 **改回日期:** 2025-02-12

引用格式: 裴龙英,刘伟,王思丹,等. 低共熔溶剂在食用菌多糖提取中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 198-206.

Citation: PEI Longying, LIU Wei, WANG Sidan, et al. Research progress on deep eutectic solvents in extraction of polysaccharides from edible mushrooms[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 198-206.

DES具有明显优势,包括溶剂组分选择性强、合成简单以及更强的氢键效应,良好的氢键效应对多糖的充分溶解和高效提取更为有利^[5]。此外,多糖提取时采用一定的辅助条件可以提高提取效率,缩短提取时间并降低能耗,其中超声波辅助的应用最为广泛^[6]。食用菌多糖的提取流程及原理如图1所示。文章拟对DES的基本组成、性质、合成及在食用菌多糖提取中的应用现状进行论述,旨在为DES在食用菌多糖提取中的应用提供依据。

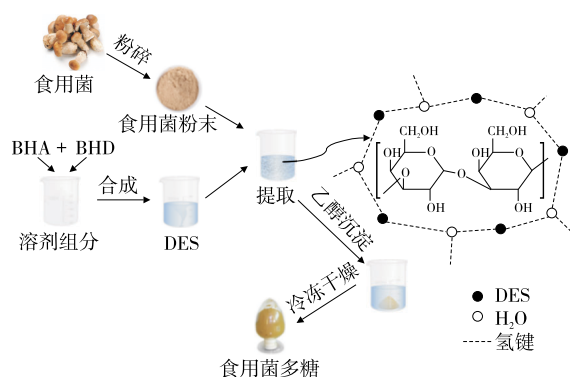


图1 DES提取食用菌多糖流程及原理

Figure 1 Process and principle of polysaccharide extraction from edible mushrooms by DES

1 低共熔溶剂组成

DES是由不同化合物经合成形成的均一溶剂,具有比原物质更低的熔点、更强的氢键效应和更好的溶解性。Abbot等^[3]研究发现,DES的组成为氯化胆碱与尿素(摩尔比1:2)。合成DES的组分选择非常广泛,常见的BHA有季铵盐(氯化胆碱)和两性离子(甜菜碱)等,BHD主要有尿素、多元羧酸(草酸、苹果酸、琥珀酸和柠檬酸等)、多元醇(甘油、丁二醇和木糖醇等)、氨基酸、肉碱和糖类(葡萄糖、果糖)等。糖-氨基酸、羧酸-多元醇和糖-糖等合成的DES也具有较好的性质和应用价值^[7]。DES可以是两组分混合物,也可以是三组分混合物。目前常应用于食用菌多糖提取研究的DES组成如图2所示。

一般情况下,DES具有较大的黏度,不利于多糖的充分溶出和传质,所以会在溶剂合成或应用时加入一定量的水来降低黏度,而水本身良好的氢键效应可以作为DES的组分之一,然而过量的水也会破坏DES的结构,导致氢键效应迅速降低甚至消失,直至变成多组分的水溶液^[8],水的加入不但可以提高提取效率,也可在一定程度上节省溶剂用量。

在多糖提取溶剂筛选过程中发现,多数DES的提取效果差异较大,这主要是其组分差异性所致,这种组分的差异性使得DES的密度、黏性、表面张力、极性和对多糖的溶解性有所不同,甚至相同的组分不同的摩尔比对溶剂的性质也有很大影响^[9]。例如,较小的黏度和表面张力使得多

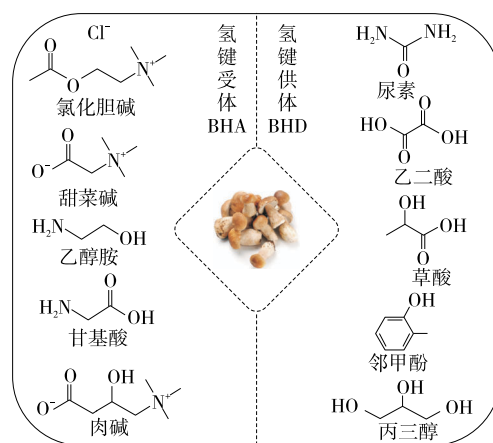


图2 常用于食用菌多糖提取的DES组成

Figure 2 Major DES composition for polysaccharide extraction from edible mushrooms

糖具有较强的组织渗透性和溶解性,而合适的极性能更好地与多糖分子相互作用,从而提高多糖提取效率^[10]。

2 低共熔溶剂合成

DES制备过程简单、易操作且制备过程中无副产物生成,常用的DES制备合成方法有加热搅拌法、真空蒸发法、研磨法和冷冻干燥法等^[11]。加热搅拌法的应用最为广泛,即在80~100℃下将各组分混合后加热搅拌,直至形成澄清液体,一般需要30~60 min,干燥后备用;研磨法是在室温下将固体组分置于研钵中充分混匀并研磨,直到形成清澈、均一的液体;真空蒸发法常用于自身黏度大,无法直接加热合成的组分,将各组分溶解在水或甲醇中,经真空蒸发、冷却后干燥至恒重;冷冻干燥法是将各组分用超纯水稀释,约达到水质量的5%,真空冷冻干燥获得透明溶剂,其中水会与DES相互作用从而影响其理化性质^[12]。此外,超声波和微波辅助合成可以加速DES的合成,显著缩短合成时间^[13]。加热搅拌、微波和超声等不同方法制备的DES的理化性质差异较小^[14]。辅助合成不仅更为节能,还可以提高DES的产率。

与加热法相比,研磨法可以在DES中引入更少的杂质,冷冻干燥法能制备更高纯度的DES,但仅限于可溶性的溶剂组分,蒸发法得到的DES稳定性更强^[15]。此外,在DES合成过程中,高温会导致由氯化胆碱和羧酸发生酯化反应而发生部分降解^[16]。图3为DES常用的6种合成方法及机理(以氯化胆碱和尿素为例)。

3 低共熔溶剂的性质

在食用菌多糖提取过程中,目标多糖的提取效率与DES的理化性质具有直接关系,DES的理化性质不仅取决于组分自身的性质,还取决于其分子间的氢键相互作用强度、亲疏水性和酸碱水平等。其中,DES的密度、黏度和极性对多糖提取过程中的传质效应有重要影响,且

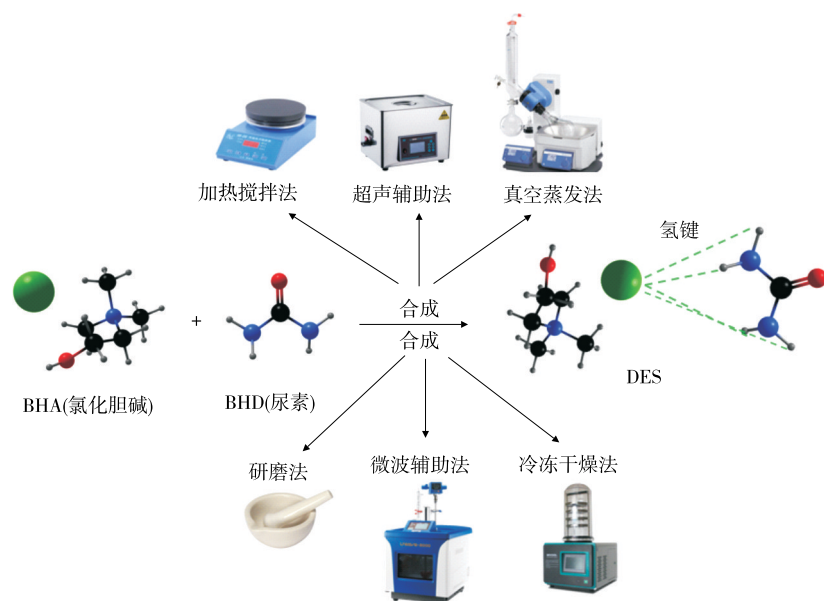


图 3 DES 主要合成方法及原理

Figure 3 Main synthesis methods and principles of DES

这些性质可以根据需要进行调节,使其更有利于多糖的提取,从而提高目标多糖的提取效率。

3.1 密度

一般来说,DES 的密度受分子堆积及其组成部分之间相互作用程度的影响,其密度通常高于传统溶剂,这使其具有更好的渗透性,高密度的 DES 也可以增加与多糖的接触面积,促进多糖从固体基质中释放。此外,高密度 DES 有助于提高超声波的传质效果,强化空化效应产生的局部高温高压环境,更有效地促进多糖溶出,但是过高的密度也会导致高黏度和不挥发性,这会极大影响多糖提取和溶剂回收过程的效率^[10]。因此,在 DES 提取过程中较为理想的密度为与水的相当或低于水的。高密度的 DES 合成和多糖提取过程中需要更多能耗,还可能造成一定的溶剂浪费。DES 的密度受多种因素影响,包括温度、BHA 和 HBD 的选择、摩尔比例和制备方法等^[17]。随着一元羧酸烷基链长度的增加,薄荷醇基 DES 的密度也随之降低,而百里香酚基 DES 的密度随着单羧酸烷基链长度的增加而提高,这是由于百里香酚会提高液体结构的紧凑性,同时也会降低其极性和黏度^[18]。

3.2 黏度

维持足够的黏度对于促进多糖提取过程中的传质至关重要,DES 的黏度反映了其内部分子间的相互作用强度,微观层面来说,DES 的黏度主要由氢键、静电和范德华力共同决定,尤其是氢键作用,高黏度的 DES 通常具有更多的氢键网络,这可能增强 DES 与多糖分子之间的相互作用,从而提高多糖的溶解度和提取效率,通过调整 DES 的组成比例或加入水,可以降低其黏度,从而提高传质效率^[19]。然而,这可能会牺牲部分氢键与多糖的相互

作用强度,因此需要通过试验优化提取条件以找到最佳的黏度平衡点,这与 DES 的密度具有相似性。由于 DES 更强的氢键作用,其黏度比有机溶剂和水高 100~1 000 倍,会降低传质水平,从而阻碍了其在多糖提取中的应用。一般来说,低黏度的 DES 具有高扩散性,可进一步改善提取性能^[20]。DES 的黏度主要取决于 HBA 和 HBD 的性质、温度和含水量。Choi 等^[21]研究发现,DES 的黏度和温度成反比,且升高温度对溶剂黏度的降低作用是剧烈的,但长时间的高温提取可能导致多糖的热降解和不可逆变性。此外,DES 的含水量也是影响其黏度的重要因素,DES 的形成主要依赖于氢键作用,而过量的水会破坏这些作用,从而削弱超分子结构,多元醇基 DES 的黏度低于酸、糖基,可能是因为多元醇中存在的小分子间的相互作用较弱,相反,由于形成了比多元醇基 DES 更强的氢键,尿素基 DES 表现出更大的黏度^[22]。

3.3 极性

由于亲水性 DES 的高极性固有性质,其对极性物质和一些水不溶性物质具有较强的增溶能力^[23]。有机酸类 DES 的极性最大,其次是氨基酸类和糖类,多元醇类的极性最小。极性较高的 DES 有助于溶解极性较强的多糖,而极性较低的 DES 则有助于溶解非极性或疏水性的多糖。高极性的 DES 可能会降低其黏度,从而提高传质效率,使得多糖分子更快地从固体基质中转移到溶剂中^[9]。更高的电负性和氢键能力构成了大多数 DES 的亲水性,使其比甲醇、乙醇、水和丙酮等传统溶剂具有更高的提取效率。以往发现的 DES 性质上多为亲水性(水溶性),阻碍了其在非水溶性多糖提取中的利用。此外,DES 的极性可以通过水的加入而发生改变,过多的含水量会阻碍

其相互作用,从而改变DES的极性水平^[24]。

4 低共熔溶剂在食用菌多糖提取中的应用

4.1 在灵芝多糖提取中的应用

灵芝(*Ganoderma lucidum*)为灵芝科灵芝属真菌,是一种常见的药食两用真菌,其中,多糖为其主要的生物活性物质之一,灵芝多糖具有免疫调节、保护肝脏和抗肿瘤等生物活性^[25]。谢苗等^[26]采用氯化胆碱—尿素型DES提取灵芝多糖,多糖得率为1.10%,比热水提取法的提高了83.33%,且多糖对DPPH自由基清除率提高了20.50%,还原力提高了47.47%。常用的DES都会加入一定量的水,这使得溶剂的重复提取及回收利用受限,而温度响应型DES(TRDES)可解决这一难题。TRDES是指通过改变温度使得DES与水的溶解度发生可逆转变,即通过温度控制提取过程中DES的均相和两相(溶剂相和水相)状态,从而在水相中回收多糖,能够同时实现多糖的高效提取和溶剂回收,从而更加符合绿色萃取的要求,其提取原理如图4所示^[27-28]。Cai等^[28]以烷醇胺为BHA,邻甲酚、间甲酚和对甲酚为BHD制备TRDES从灵芝中提取多糖,筛选得到乙醇胺—邻甲酚为最优提取溶剂,最大多糖提取率为92.35 mg/g,在水相中的最大回收率为88.09%,重复提取5次后多糖提取率稍有下降且邻苯酚的回收率在85%以上,邻甲酚的损失可能是由于少量的邻甲酚溶解在乙醇胺溶液中,而较好的提取稳定性主要是由于DES较强的氢键效应和重复提取导致体系黏度下降所致,与唐兰芳等^[29-30]的结论一致,表明DES的重复提取和回收利用是可行的。此外,进一步采用密度泛函理论(DFT)计算证明,氢键相互作用是影响多糖提取率的主要因素,其中HBA起主导作用。

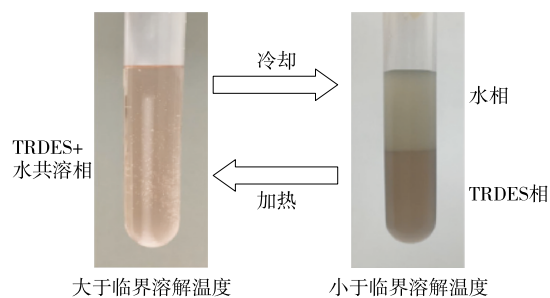


图4 TRDES提取多糖原理^[28]

Figure 4 Principle of polysaccharide extraction by TRDES

何仙玉等^[31]采用氯化胆碱—乳酸—愈创木酚三元DES提取得到灵芝多糖(*Ganoderma lucidum* polysaccharides, GLPs),提取率达到9.20%,为水浸提法的4.3倍,重复提取5次后多糖提取率仍达到4.89%,溶剂回收率为88%;GLPs具有较强的DPPH自由基、ABTS自由基、OH自由基清除力和总还原力;采用DFT分析GLPs的分子机制,发现DES与葡萄糖之间的结合能远高于水与

葡萄糖之间的,明确了GLPs是通过三重氢键的相互作用实现的,与Cai等^[28]的研究结果相近,从而揭示了DES提取多糖效果优于传统提取法的分子机制。

4.2 在羊肚菌多糖提取中的应用

羊肚菌(*Morchella. spp*)是一类珍贵的食药两用菌,是世界四大野生名菌之首。羊肚菌多糖具有免疫调节、抗氧化剂、促进消化和抗疲劳等功效^[32]。Pan等^[33]采用氯化胆碱—草酸体系在超声辅助条件下提取得到梯棱羊肚菌(*Morchella esculenta*)多糖,相较于水提法,多糖含量显著提高(85.27%),提取率提高了4.5倍,多糖和单糖组成基本相同,但相对分子质量更小,这主要是由于超声诱导多糖产生的空化效应所致^[34]。虽然超声对多糖的结构有一定的破坏作用,但是一般能够显著提高多糖的提取效率。此外,提取得到的羊肚菌多糖具有良好的抗氧化活性和 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶抑制活性。Xu等^[35]还研究了酸性DES(氯化胆碱—草酸)和碱性DES(氯化胆碱—尿素)提取多糖的性质、活性差异性,发现超声波辅助酸、碱性DES提取的多糖具有相似的单糖组成、红外吸收和热稳定性,与超声水提法相比,酸性DES提取的多糖具有更高的总糖和硫酸基含量,较低的相对分子质量、粒度、黏度和系统稳定性。由于其支链结构被酸性DES过度水解,尤其是高活性糖苷键(1 $\rightarrow$ 2),且低相对分子质量导致其降糖和降脂活性降低;碱性DES提取的多糖糖苷键和硫酸基含量较高,相对分子质量较大,也具有较强的降血糖、降血脂活性。张景等^[36]参考谢苗等^[26]的方法提取羊肚菌多糖,但未加水,这可能会造成溶剂较高的黏度,限制了多糖提取过程中的传质,结果得到的提取率低于热水提取法,但是高于柠檬酸提取法和碱提法,也可能是不同食用菌多糖结构的特异性使其与DES的氢键相互作用的差异性所致。

4.3 在茯苓多糖提取中的应用

DES提取得到的多糖的理化性质、生物活性和应用潜能与传统提取方法所得多糖均有一定差异,多糖的理化性质及应用特性也是产品研发应用的重要依据^[37]。茯苓(*Poria cocos* (Shw.) Wolf)作为一种药食同源中药材,在干预癌症和心神不宁方面具有较高潜力,其中,多糖是其主要的功效成分^[38]。Zhang等^[39]发现,氯化胆碱—草酸型DES在最佳提取工艺下的多糖提取率为46.24%,为同条件下热水提取的8.6倍,重复提取6次后提取率仍较高(38.40%)。DES提取的多糖相对分子质量显著低于水提多糖,可能是DES更大程度地破坏了多糖的复杂结构,降低了多糖分子内和分子间的相互作用。Lynam等^[40]研究表明,高相对分子质量多糖的生物活性通常较高,可能是大相对分子质量多糖具有更多的活性作用位点和有效的空间结构,另一方面,高相对分子质量会导致多糖较差的水溶性和吸收利用水平,对其生物活性发挥有所限制,表明该型DES可能是茯苓小相对分子质量多糖提取的优良溶剂。Zhai等^[41]采用相同方法提取得到茯苓中相对分子

质量为 3 200 的葡聚糖,经纯化后总糖含量高达 96.89%,该多糖易溶于水而不溶于有机溶剂,具有较好的持水力和持油力,但其抗氧化活性较低。采用由氯化胆碱、1,3-丁二醇和 *D*-山梨醇组成的三元 DES,在远红外辐射和热空气循环辅助下,最优工艺下茯苓多糖提取率达到 55% 以上,与传统提取方法相比,该方法的提取残渣更少,能耗更低,是一种高效可持续的茯苓多糖提取方法,该多糖在 500 $\mu\text{g/mL}$ 时对乙酰胆碱酯酶和丁酰胆碱酯酶的抑制率达到 73.82% 和 63.85%,表现出与多奈哌齐相似的抑制活性,可能是一种潜在的胆碱酯酶抑制剂。

4.4 在鳞杯伞多糖提取中的应用

鳞杯伞(*Clitocybe squamulosa*)属伞菌目白蘑科杯伞属,是山西五台山地区的特色菌种,长期食用具有预防动脉硬化和提高免疫力的功效^[42]。刘荣柱等^[43]利用氯化胆碱—草酸二水化合物型 DES 经超声辅助提取得到鳞杯伞多糖(D-CSFP),多糖提取率、得率、多糖含量分别为 5.31%,6.52%,81.42%,多糖得率显著高于水提法且提取时间较短,这可能是多糖在相对温和的提取条件下不易降解,且 DES 具有更好的极性、黏度和张力,加快了多糖的溶出和传质进程,从而缩短了提取时间;D-CSFP 与水多糖的单糖组成不同且相对分子质量更小,流变学性能良好,可作为一种水凝胶体应用于食品、药品等领域。进一步研究^[44-45]发现,D-CSFP 可能通过调节 Nrf2/NF- κ B 信号通路来保护被 H_2O_2 损伤的 RAW264.7 细胞;D-CSFP 也可能通过调节 NF- κ B 信号通路来减轻 RAW264.7 细胞的炎症损伤,从而达到抗炎效果;D-CSFP 经唾液—胃—肠液消化后发生不同程度的降解,相对分子质量降低。此外,D-CSFP 可以有效提高 *Bacteroides*、*Prevotella* 和 *Dialister* 等有益菌的相对丰度和短链脂肪酸总量,还可以抑制有害菌(*Klebsiella*)的增殖。

4.5 在香菇多糖提取中的应用

不同 DES 对于多糖的溶解性差异较大,需通过试验逐一筛选。COSMO-RS 是预测小分子化合物和聚合物溶解度的有力工具,通过计算分子或聚合物表征模型在液体溶液中的化学势来评估溶解度系数和活性系数,通过软件对大量 DES 进行初步模拟计算,进一步验证,极大降低了研究成本和人力、时间投入。COSMO-RS 已被应用于低聚糖、纤维素和果胶类物质提取中^[46-47],为 COSMO-RS 用于预测食用菌多糖在 DES 中的溶解度提供了可能。

香菇(*Lentinula edodes*)具有鲜美的风味和极高的营养价值,是日常消费及食用最多的食用菌之一。Wang 等^[48]确定了 372 种 DES,通过 COSMO-RS 评价香菇柄多糖的溶出能力,结果发现肉碱—尿素体系对香菇柄多糖的提取效果最好,为了优化体系含水量,采用单纯形质心混料设计来优化三元组分比例,进一步建立了遗传算法—人工神经网络(ANN-GA)优化提取条件(ANN 可以模拟变量之间复杂的非线性关系,比传统的响应面法更

加精确,GA 是一种优化求取全局最优解的有效进化算法^[49]),最终得到优化条件下香菇多糖的提取率为 18.45%。但是,较高的提取温度(100 $^{\circ}\text{C}$)和长达 142 min 的提取会产生较高的能耗,还可能对多糖的结构产生一定破坏。总之,多数研究^[50-51]已证明 COSMO-RS 和 ANN-GA 可作为 DES 组分筛选和提取工艺优化的可靠工具,可推广到其他食用菌多糖的高效提取研究中。

β -葡聚糖是一类广泛分布在高等植物、真菌和藻类中的大分子多糖,具有包括提高机体免疫力的多种功效,被广泛应用于医药保健、食品等行业中^[52],香菇中富含 β -葡聚糖型多糖(19%~29%)^[53]。Vezaro 等^[54]采用超声辅助水和甘油基 DES 提取香菇中的 β -葡聚糖,在振幅为 88.36%、脉冲周期为 0.93 时,DES 的最高提取率为 25.11%;在振幅为 100%,脉冲周期为 0.75 时,水的最高提取率为 23.47%,在两种溶剂中,使用较高的振幅和脉冲周期获得了最佳的产率和多糖浓度,与水提法相比,DES 提取的多糖具有更高的抗氧化活性。此外,粗多糖产量提高了 6.99%,表明 DES 具有提取香菇及其他食用菌中高抗氧化性 β -葡聚糖的潜力,可用于食品与制药行业。

4.6 在黑木耳多糖提取中的应用

黑木耳(*Auricularia auricula*)作为一种常用的食材,具有补气养血、美容养颜的功效,多糖作为主要的活性成分,含量达到 70% 以上^[55]。Yao 等^[56]采用超声辅助 DES 提取黑木耳多糖,三甘醇和甘油基 DES 的提取率低于相同条件下的水提取法,这可能是其对木耳多糖的选择性和溶解能力较差的原因;氯化胆碱—乙二醇型 DES 在含水量 40% 条件下,相较于同条件下超声水提法,提取率提高了 18.68%;DES 提取多糖(AAPs-UD)表现出更强的 DPPH 自由基、ABTS 自由基和 OH 自由基清除能力,低浓度的多糖处理延长了秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)的最高寿命和平均存活时间;相较于水提多糖,DES 提取得到的多糖相对分子质量更小。此外,AAPs-UD 可使胰岛素和 IGF-1 信号通路中抗氧化相关基因 *daf-16*、*sir-2.1* 和 *sod-3* 的表达水平上调 1.5 倍以上,也促进了雷帕霉素靶蛋白通路中 *skn-1* 的表达。

4.7 在桑黄多糖提取中的应用

桑黄(*Phellinus* spp.)是生长于桑树树干上的一种真菌,俗称桑耳、桑臣、胡孙眼等,桑黄多糖具有抗肿瘤、抗衰老和提高免疫力等活性,尤其在抗肿瘤方面,可以与传统抗肿瘤药物联用起到协同效果^[57]。于秋菊等^[58]采用 8 种醇基 DES,经超声辅助提取桑黄子实体中的多糖,其中氯化胆碱—丙三醇型 DES 经优化后的提取率达到 13.11%,为传统水提法的 8.6 倍^[59],纯化后的多糖具有一定的抗氧化活性且表现出量效关系;桑黄多糖对肝癌 SMMC-7721、宫颈癌 Hep G2215、肺癌 AE1201、乳腺癌 MDAMB415 和胃癌 BGC823 细胞增殖均具有一定抑制作用,其中对宫颈癌细胞($\text{IC}_{50}=81.19 \mu\text{g/mL}$)和肝癌细胞

($IC_{50}=81.19 \mu\text{g/mL}$)的抑制效果最为敏感,揭示了该型桑黄多糖在宫颈癌和肝癌干预治疗方面良好的应用潜力。

4.8 在双孢菇多糖提取中的应用

食用菌细胞壁中的甲壳素往往是以甲壳素-葡聚糖复合物(CGC)的形式存在^[60],其中葡聚糖与甲壳素共价结合,具有诸多有利特性,包括良好的生物降解性,其在药物递送^[61]、伤口愈合^[62]和重金属去除^[63]等方面具有一定的潜力。Kim等^[64]使用5种DES制备双孢菇中的CGC,相较于碱提法得到的不溶性CGC,甜菜碱-尿素体系提取的CGC的蛋白和矿物质含量较低。此外,DES提取产生2种类型的CGCs:不溶残渣(沉淀)和可溶提取物(上清),上清与沉淀的总产率达到28%,其中甲壳素与葡聚糖的比例分别为36:64和64:66,乙酰化程度分别达到77.34%和57.32%;最高降解温度为318℃,说明此时多糖已完全分解;DES提取的CGC相较于碱提取呈现更加疏松的多孔结构,是一种白金针菇CGC制备的潜在替代方法,制备条件更加温和、环保,在材料和制药行业具有良好的前景。

4.9 在冬虫夏草多糖提取中的应用

冬春夏草(*Cordyceps sinensis*)是一种名贵的虫草真菌复合体,多糖作为其中重要的功能成分,具有显著调节肠道菌群、改善肥胖和2型糖尿病的功效^[65-66]。Wang等^[67]以氯化胆碱和甜菜碱作为BHA制备了15种DES提取冬虫夏草多糖,发现氯化胆碱-琥珀酸体系的提取效果最好,多糖得率达到12.78%,显著高于热水提取法的;两种多糖具有相同的单糖组成,但DES提取的多糖的葡糖醛酸含量是水提多糖的4倍以上,表明DES中的氢键与糖醛基的亲水性可能更强;而且,DES提取的多糖能够通过激活RAW264.7巨噬细胞中相应的mRNA表达,更好地提高NO、IL-6、TNF- α 和IL-1 β 的分泌水平。羧酸基DES在多糖提取中的效果普遍优于醇基体系,这可能是羧酸基DES合成后更强的氢键效应有利于多糖的充分溶出。

5 展望

DES具有比传统有机溶剂更高的提取效率,且在与超声、微波辅助技术结合后,可以在降低能耗和缩短提取时间的同时,显著提高多糖提取率^[68]。目前已开发了一系列成熟的多糖提取溶剂,但仍需大力开发新的具有更优良性质的DES,且不同食用菌多糖在相同DES中的溶解性也具有差异性,因此,开发具有针对性的DES极为重要。传统的试验筛选研究不仅工作繁琐,且成本较高,后续可以通过COSMO-RS等分子模拟软件进行计算筛选,有效选择合适类型的特异性溶剂。

通常,基于DES的提取方法具有更高的选择性和更强的溶解力,且具有较强的可控性和适应性,通过选择合适的DES体系和优化提取条件,在提高提取效率的同时,使多糖提取更具针对性和经济性。此外,与传统提取法相比,多数DES提取得到的多糖生物活性更强。也有研

究^[69]证实,DES重复多次提取仍能保持较高的多糖提取率,但DES在多糖工业制备上的放大应用较少。值得一提的是,DES是非挥发性的,这为多糖的浓缩、分离和溶剂回收带来了困难。目前,实验室对于多糖的初步分离仍采用乙醇沉淀法,需消耗更多的乙醇,但仍有一些研究采用大孔树脂、反萃取和固相萃取等分离手段,会使多糖提取过程更加需要技术与成本支持^[70-71]。为了更好地应用和推广这种新型多糖提取溶剂,需要进一步完善提取方法和工艺,开发更加低成本的DES和溶剂回收方法。

6 结论

低共熔溶剂作为一种新兴的绿色溶剂,在提高多糖提取效率、纯度以及保留生物活性方面展现出显著优势。低共熔溶剂的高溶解性、温和提取条件和低能耗特性,使其在食用菌多糖的提取过程中,相较于传统溶剂,表现出更高的提取率和纯度,同时避免了高温和不适宜的酸碱条件对多糖结构和活性的破坏。虽然低共熔溶剂在多糖提取中的应用前景广阔,但仍需要进一步优化提取工艺,降低成本,并评估其在工业化生产中的可行性。总之,随着对低共熔溶剂性质的深入探究和提取技术的改进,低共熔溶剂表现出的优良性质将为开发食用菌多糖和产品提供重要思路。

参考文献

- [1] RONCERO-RAMOS I, DELGADO-ANDRADE C. The beneficial role of edible mushrooms in human health[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 122-128.
- [2] XUE H K, WANG W L, BIAN J Y, et al. Recent advances in medicinal and edible homologous polysaccharides: extraction, purification, structure, modification, and biological activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 1110-1126.
- [3] ABBOTT A P, CAPPER G, DAVIES D L, et al. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures[J]. Chemical Communications, 2003(1): 70-71.
- [4] OMAR K A, SADEGHI R. Physicochemical properties of deep eutectic solvents: a review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119524.
- [5] 李利芬, 余丽萍, 梁坚坤, 等. 低共熔溶剂提取植物活性成分的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(3): 7-10.
LI L F, YU L P, LIANG J K, et al. Research progress on extraction of plant active components by deep eutectic solvents [J]. Cereals & Oils, 2020, 33(3): 7-10.
- [6] CHEMAT F, ROMBAUT N, SICAIRE A G, et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 540-560.
- [7] DUAN L, DOU L L, GUO L, et al. Comprehensive evaluation of deep eutectic solvents in extraction of bioactive natural products[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4

- (4): 2 405-2 411.
- [8] SHAH D, MJALLI F S. Effect of water on the thermo-physical properties of reline: an experimental and molecular simulation based approach[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(43): 23 900-23 907.
- [9] DAI Y T, WITKAMP G J, VERPOORTE R, et al. Natural deep eutectic solvents as a new extraction media for phenolic metabolites in *Carthamus tinctorius* L[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(13): 6 272-6 278.
- [10] YAHAYA N, MOHAMED A H, SAJID M, et al. Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for extraction of polysaccharides from natural sources: status, challenges and prospects[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 338: 122199.
- [11] SINGH M B, KUMAR V S, CHAUDHARY M, et al. A mini review on synthesis, properties and applications of deep eutectic solvents[J]. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2021, 98(11): 100210.
- [12] DAI Y T, VAN SPRONSEN J, WITKAMP G J, et al. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 766: 61-68.
- [13] WANG X S, WU Y F, LI J, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of echinacoside and oleuropein from *Syringa pubescens* Turcz[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 151: 112442.
- [14] GOMEZ D F J V, ESPINO P M, FERNÁNDEZ D M A, et al. A greener approach to prepare natural deep eutectic solvents [J]. *Chemistry Select*, 2018, 3(22): 6 122-6 125.
- [15] SANTANA A P R, MORA-VARGAS J A, GUIMARÃES T G S, et al. Sustainable synthesis of natural deep eutectic solvents (NADES) by different methods[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 293: 111452.
- [16] RODRIGUEZ RODRIGUEZ N, VAN DEN BRUINHORST A, KOLLAU L J B M, et al. Degradation of deep-eutectic solvents based on choline chloride and carboxylic acids[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(13): 11 521-11 528.
- [17] CHEMAT F, ABERT VIAN M, RAVI H K, et al. Review of alternative solvents for green extraction of food and natural products: panorama, principles, applications and prospects[J]. *Molecules*, 2019, 24(16): 3 007.
- [18] BERGUA F, CASTRO M, LAFUENTE C, et al. Thymol+1-menthol eutectic mixtures: thermophysical properties and possible applications as decontaminants[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 368: 120789.
- [19] MJALLI F S, AHMED O U. Ethaline and Glyceline binary eutectic mixtures: characteristics and intermolecular interactions[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2017, 12(2): 313-320.
- [20] EMAMI S, SHAYANFAR A. Deep eutectic solvents for pharmaceutical formulation and drug delivery applications[J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2020, 25(7): 779-796.
- [21] CHOI Y H, VERPOORTE R. Green solvents for the extraction of bioactive compounds from natural products using ionic liquids and deep eutectic solvents[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 26: 87-93.
- [22] BENVENUTTI L, ZIELINSKI A A F, FERREIRA S R S. Which is the best food emerging solvent: IL, DES or NADES? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 90: 133-146.
- [23] MIŠAN A, NAĐPAL J, STUPAR A, et al. The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(15): 2 564-2 592.
- [24] GULLÓN P, GULLÓN B, ROMANÍ A, et al. Smart advanced solvents for bioactive compounds recovery from agri-food by-products: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 101: 182-197.
- [25] 陈奕君, 杨小梅, 林丽华. 赤灵芝的营养成分、生物活性及其应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(6): 227-232.
- CHEN Y J, YANG X M, LIN L H. Research progress on the nutritional composition, biological activity, and application of *Ganoderma lucidum*[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(6): 227-232.
- [26] 谢苗, 亓小妮, 张鑫, 等. 低共熔溶剂提取灵芝多糖的工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 123-129.
- XIE M, QI X N, ZHANG X, et al. Study on process optimization and antioxidant activity of polysaccharide from *Ganoderma lucidum* extracted by deep eutectic solvents[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(5): 123-129.
- [27] QIAO Y X, MA W B, THEYSEN N, et al. Temperature-responsive ionic liquids: fundamental behaviors and catalytic applications[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(10): 6 881-6 928.
- [28] CAI C Y, WANG Y N, YU W, et al. Temperature-responsive deep eutectic solvents as green and recyclable media for the efficient extraction of polysaccharides from *Ganoderma lucidum*[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123047.
- [29] 唐兰芳. 黄精多糖低共熔溶剂提取工艺和特性研究及应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- TANG L F. Study on extraction technology, characteristic of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* extracted by deep eutectic solvents and application[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [30] WANG N, LI Q. Study on extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Radix Bupleuri* by natural deep eutectic solvents combined with ultrasound-assisted enzymolysis[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 30: 100877.
- [31] 何仙玉, 李镕基, 李小艳, 等. 氯化胆碱/乳酸/愈创木酚三元共熔溶剂提取灵芝多糖的工艺及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(14): 34-41.
- HE X Y, LI R J, LI X Yet al. *Ganoderma lucidum*

- polysaccharides extraction by choline chloride/lactic acid/guaiacol ternary deep eutectic solvent and its antioxidant activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 34-41.
- [32] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*): nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(11): 1 888-1 901.
- [33] PAN X, XU L J, MENG J L, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of polysaccharides from *Morchella importuna*: optimization, physicochemical properties, and bioactivities[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 912014.
- [34] DU B, JEEPIPALI S P K, XU B J. Critical review on alterations in physicochemical properties and molecular structure of natural polysaccharides upon ultrasonication[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106170.
- [35] XU L J, PAN X, LI D J, et al. Structural characterization, rheological characterization, hypoglycemic and hypolipidemic activities of polysaccharides from *Morchella importuna* using acidic and alkaline deep eutectic solvents[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 193: 115742.
- [36] 张景, 刘养山, 任洪飞, 等. 羊肚菌多糖的提取优化及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 317-324.
- ZHANG J, LIU Y S, REN H F, et al. Study on the extraction optimization and antioxidant activity of *Morchella esculenta* polysaccharides[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 317-324.
- [37] 徐湘, 庞旭佳, 张名位, 等. 不同提取工艺淮山多糖的理化性质及抗氧化活性分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 128-138.
- XU X, PANG X J, ZHANG M W, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of Chinese yam polysaccharides extracted by different methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 128-138.
- [38] 徐攀, 张芳铭, 郝慧, 等. 羧甲基茯苓多糖的生物活性与食品应用[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 213-220.
- XU P, ZHANG F M, ZHEN H, et al. Biological activity and food application of carboxymethyl pachymaran[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 213-220.
- [39] ZHANG W D, CHENG S B, ZHAI X N, et al. Green and efficient extraction of polysaccharides from *Poria cocos* F.A. wolf by deep eutectic solvent[J]. Natural Product Communications, 2020, 15(2): 54-56.
- [40] LYNAM J G, KUMAR N, WONG M J. Deep eutectic solvents' ability to solubilize lignin, cellulose, and hemicellulose; thermal stability; and density[J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 684-689.
- [41] ZHAI X N, ZHANG W D, PEI H S, et al. Structure and physicochemical properties of polysaccharides from *Poria cocos* extracted by deep eutectic solvent[J]. Glycoconjugate Journal, 2022, 39(4): 475-486.
- [42] GUO Y Y, LI Y S, LI Z C, et al. Extraction assisted by far infrared radiation and hot air circulation with deep eutectic solvent for bioactive polysaccharides from *Poria cocos* (Schw.) wolf[J]. Green Chemistry, 2021, 23(18): 7 170-7 192.
- [43] 刘荣柱, 郭东东, 潘旭, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取鳞杯伞多糖工艺优化及结构和流变学特性[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 67-77.
- LIU R Z, GUO D D, PAN X, et al. Ultrasound assisted extraction of polysaccharides from *Clitocybe squamulosa* with deep eutectic solvents: optimization, structure and rheological [J]. Acta Edulis Fungi, 2022, 29(6): 67-77.
- [44] 耿雪冉, 王无霞, 刘荣柱, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取的鳞杯伞多糖的体外消化与酵解特性[J]. 菌物学报, 2024, 43(4): 84-97.
- GENG X R, WANG W X, LIU R Z, et al. In vitro digestion and fermentation characteristics of *Clitocybe squamulosa* polysaccharides extracted by ultrasound-assisted deep eutectic solvents[J]. Mycosystema, 2024, 43(4): 84-97.
- [45] 刘荣柱. 低共熔溶剂提取鳞杯伞多糖的抗氧化、抗炎活性与体外消化酵解特性[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
- LIU R Z. Extraction of polysaccharides from *Clitocybe squamulosa* with deep eutectic solvents: antioxidant, anti-inflammatory and digestion and fermentation characteristics [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [46] MOHAN M, BANERJEE T, GOUD V V. COSMO-RS-based screening of antisolvents for the separation of sugars from ionic liquids: experimental and molecular dynamic simulations [J]. ACS Omega, 2018, 3(7): 7 358-7 370.
- [47] CHU Y H, ZHANG X P, HILLESTAD M, et al. Computational prediction of cellulose solubilities in ionic liquids based on COSMO-RS[J]. Fluid Phase Equilibria, 2018, 475: 25-36.
- [48] WANG D Y, ZHANG M, LAW C L, et al. Natural deep eutectic solvents for the extraction of lentinan from shiitake mushroom: COSMO-RS screening and ANN-GA optimizing conditions[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136990.
- [49] 宋建忠, 陈盈盈, 杨婧, 等. 人工神经网络—遗传算法优化刺糖低聚糖提取工艺的研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(6): 1-7.
- SONF J Z, CHEN Y Y, YANG J, et al. Study on the optimization of the extraction process of polysaccharides from *Saccharum alhagi* by artificial neural network-genetic algorithm method[J]. China Food Additives, 2022, 33(6): 1-7.
- [50] 姚金昊, 刘芝涵, 李春露, 等. 基于COSMO-RS方法筛选低共熔溶剂及银杏叶类黄酮提取工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 181-186.
- YAO J H, LIU Z H, LI C X, et al. COSMO-RS-based screening of natural deep eutectic solvents and optimization of flavonoids extraction from *Ginkgo biloba* leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 181-186.
- [51] MUTHUSAMY S, MANICKAM L P, MURUGESAN V, et al. Pectin extraction from *Helianthus annuus* (sunflower) heads using RSM and ANN modelling by a genetic algorithm

- approach[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 750-758.
- [52] 郭瑞, 周爽, 王文秀, 等. β -葡聚糖的营养健康功能研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 33-39.
- GUO R, ZHOU S, WANG W X, et al. Advances in nutrition and health function of β -glucan[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 33-39.
- [53] 贾薇, 余燕贞, 刘红丽, 等. 香菇子实体中高 β -葡聚糖含量多糖提取物制备及体外免疫活性[J]. 食用菌学报, 2023, 30(4): 51-58.
- JIA W, YU Y Z, LIU H L, et al. Preparation and in vitro activity of β -glucan-rich polysaccharide extracts from *Lentinula edodes* fruiting bodies[J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(4): 51-58.
- [54] VEZARO F D, DA ROSA B V, KUHN R C. Ultrasound-assisted extraction of β -glucans from *Lentinula edodes* using natural deep eutectic solvent and water[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2022, 97(12): 3 306-3 316.
- [55] 陈玥彤, 张闪闪, 李文意, 等. 黑木耳多糖的磷酸化修饰、结构表征及体外降糖活性[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 29-35.
- CHEN Y T, ZHANG S S, LI W Y, et al. Structural characterization and hypoglycemic effect in vitro of phosphorylated *Auricularia auriculata* polysaccharide[J]. Food Science, 2022, 43(8): 29-35.
- [56] YAO J, ZENG J Y, TANG H N, et al. Effect of deep eutectic solvent extraction on *Auricularia auricula* polysaccharide solubilization and antioxidant potential[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023, 34: 101166.
- [57] 李雨鸿, 殷朝敏, 范秀芝, 等. 桑黄提取物的体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 71-80.
- LI Y H, YIN C M, FAN X Z, et al. In vitro anti-oxidant, hypoglycemic, and hypouricemic activities of *Sanghuangporus vaninii* extracts[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 71-80.
- [58] 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 Q J, SUN K, GENG F Y. 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.
- [59] 逢梦玉, 隋昕怡, 刘丹, 等. 桑黄多糖提取工艺优化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 48-57.
- JIANG M, SUI X, LIU D, et al. Optimization of extraction process, structural characterization and antioxidant activity of *Sanghuangporus sanghuang* polysaccharides[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(12): 48-57.
- [60] CURTO M Á, BUTASSI E, RIBAS J C, et al. Natural products targeting the synthesis of $\beta(1,3)$ -D-glucan and chitin of the fungal cell wall[J]. Phytomedicine, 2021, 88: 153556.
- [61] AHMAD A, MUBARAK N M, NASEEM K, et al. Recent advancement and development of chitin and chitosan-based nanocomposite for drug delivery: critical approach to clinical research[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(12): 8 935-8 964.
- [62] ABDEL-MOHSEN A M, JANCAR J, MASSOUD D, et al. Novel chitin/chitosan-glucan wound dressing: isolation, characterization, antibacterial activity and wound healing properties[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2016, 510(1): 86-99.
- [63] LIU Y, GAO L L, CHEN L G, et al. Exploring carbohydrate extraction from biomass using deep eutectic solvents: factors and mechanisms[J]. iScience, 2023, 26(9): 107671.
- [64] KIM H, KANG S, LI K, et al. Preparation and characterization of various chitin-glucan complexes derived from white button mushroom using a deep eutectic solvent-based ecofriendly method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 169: 122-129.
- [65] WU T R, LIN C S, CHANG C J, et al. Gut commensal *Parabacteroides goldsteinii* plays a predominant role in the anti-obesity effects of polysaccharides isolated from *Hirsutella sinensis*[J]. Gut, 2019, 68(2): 248-262.
- [66] CHEN S P, WANG J Q, FANG Q Y, et al. A polysaccharide from natural *Cordyceps sinensis* regulates the intestinal immunity and gut microbiota in mice with cyclophosphamide-induced intestinal injury[J]. Food & Function, 2021, 12(14): 6 271-6 282.
- [67] WANG Y B, XU F J, CHENG J W, et al. Natural deep eutectic solvent-assisted extraction, structural characterization, and immunomodulatory activity of polysaccharides from *Paecilomyces hepiali*[J]. Molecules, 2022, 27(22): 8 020.
- [68] DELLA POSTA S, GALLO V, GENTILI A, et al. Strategies for the recovery of bioactive molecules from deep eutectic solvents extracts[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2022, 157: 116798.
- [69] TAN J Q, CUI P S, GE S Q, et al. Ultrasound assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from *Cornus officinalis* fruit: modeling, optimization, purification, and characterization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105966.
- [70] CAO J, CHEN L Y, LI M H, et al. Two-phase systems developed with hydrophilic and hydrophobic deep eutectic solvents for simultaneously extracting various bioactive compounds with different polarities[J]. Green Chemistry, 2018, 20(8): 1 879-1 886.
- [71] 冀晓龙, 郭建行, 田静源, 等. 植物多糖降解方法及降解产物特性研究进展[J]. 轻工学报, 2023, 38(3): 55-62.
- JI X L, GUO J H, TIAN J Y, et al. Research progress on degradation methods and product properties of plant polysaccharides[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(3): 55-62.