

天然多糖-多酚偶联物的提取分离纯化方法、结构表征和生物活性的研究进展

任一萌, 高媛, 孔淑华, 赵进文, 任丹丹, 马艺超, 刘舒, 何云海, 汪秋宽

Research Progress on Extraction, Separation and Purification Methods, Structural Characterization and Biological Activity of Natural Polysaccharide-polyphenol Conjugates

REN Yimeng, GAO Yuan, KONG Shuhua, ZHAO Jinwen, REN Dandan, MA Yichao, LIU Shu, HE Yunhai, and WANG Qiukuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

任一萌, 高媛, 孔淑华, 等. 天然多糖-多酚偶联物的提取分离纯化方法、结构表征和生物活性的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 400–407. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060022

REN Yimeng, GAO Yuan, KONG Shuhua, et al. Research Progress on Extraction, Separation and Purification Methods, Structural Characterization and Biological Activity of Natural Polysaccharide-Polyphenol Conjugates[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 400–407. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060022

· 专题综述 ·

天然多糖-多酚偶联物的提取分离纯化方法、 结构表征和生物活性的研究进展

任一萌¹, 高媛¹, 孔淑华¹, 赵进文¹, 任丹丹^{1,2,3,*}, 马艺超^{1,2,3,*}, 刘舒^{1,2,3}, 何云海^{1,2,3}, 汪秋宽^{1,2,3}

(1.大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁大连 116023;

2.辽宁省水产品加工及综合利用重点实验室, 辽宁大连 116023;

3.国家海藻加工技术研发分中心, 辽宁大连 116023)

摘要:天然多糖-多酚偶联物是由多糖和多酚通过化学或生物化学反应偶联形成的物质, 具有比单一多糖或多酚更好的生物活性, 包括抗炎、抗氧化、抗凝血、辐射保护、抗血小板、降血糖等, 在食品、医药等领域具有广泛的应用前景, 已成为目前研究热点。不同的提取、分离纯化方法不仅对天然多糖-多酚偶联物的提取率有影响, 还会影响其酚糖组成的含量, 进而影响其生物活性。由于天然多糖-多酚偶联物的结构复杂, 目前尚未明确解析其结构及相互作用机制。本文对天然多糖-多酚偶联物的提取、分离纯化、结构表征和生物活性的研究进展进行了综述, 以期后续功能食品的开发提供新资源, 为酚糖偶联物在食品保健品与化妆品领域应用提供理论依据。

关键词:多糖-多酚偶联物, 提取方法, 分离纯化, 结构表征, 生物活性

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0400-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060022

本文网刊:



Research Progress on Extraction, Separation and Purification Methods, Structural Characterization and Biological Activity of Natural Polysaccharide-Polyphenol Conjugates

REN Yimeng¹, GAO Yuan¹, KONG Shuhua¹, ZHAO Jinwen¹, REN Dandan^{1,2,3,*}, MA Yichao^{1,2,3,*},
LIU Shu^{1,2,3}, HE Yunhai^{1,2,3}, WANG Qiukuan^{1,2,3}

(1.College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2.Liaoning Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Comprehensive Utilization,
Dalian 116023, China;

3.National Seaweed Processing Technology Research and Development Branch Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Natural polysaccharide-polyphenol conjugates are compounds formed by the coupling of polysaccharides and polyphenols through chemical or biochemical reactions, which have better biological activities than a single polysaccharide or polyphenol, including anti-inflammatory, antioxidant, anticoagulation, radiation protection, anti-platelet, hypoglycemic activity, etc. So they have broad application prospects in the fields of food, medicine, etc., and have become a current research hotspot. Different extraction, separation and purification methods not only have an impact on the extraction rate of natural polysaccharide-polyphenol conjugates, but also will affect the content of their composition, thereby affecting their

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 国家藻类产业技术体系岗位科学家项目 (CARS-50); 辽宁省应用基础研究计划项目 (2023JH2/101300112); 辽宁省自然科学基金联合基金项目博士启动 (2023-BSBA-009); 辽宁省属本科高校基本科研项目 (LJ212410158012, 2024JBQNZ014)。

作者简介: 任一萌 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 褐藻加工, E-mail: 17884103280@163.com。

* 通信作者: 任丹丹 (1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工, E-mail: rdd80@163.com。

马艺超 (1992-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 褐藻加工, E-mail: 18640876812@163.com。

biological activity. Due to the complex structure of natural polysaccharide-polyphenol conjugates, its structure and interaction mechanism have not yet been clearly analyzed. The research progress on the extraction, separation, purification, structural characterization, and biological activities of natural polysaccharide-polyphenol conjugates is reviewed in this paper, in order to provide new resources for the development of subsequent functional foods and theoretical references for the application of polysaccharide-polyphenol conjugates in the fields of functional food and cosmetics.

Key words: polysaccharide-polyphenol conjugates; extraction method; separation and purification; structure characterization; biological activity

多酚和多糖是自然界中常见的两大类生物活性物质,它们广泛存在于各种植物组织中,为植物提供了必要的保护和营养功能。在植物体内多糖和多酚通过化学或生物化学反应偶联形成的多糖-多酚偶联物^[1],是天然存在的化合物,而酚糖复合物主要通过共价和非共价相互作用而形成^[2],可通过人工合成。近年来,国内外学者对多酚与多糖的单一成分进行了广泛的研究^[3-6],揭示了它们各自的生物活性和功能,然而,对天然多糖-多酚偶联物的研究还很有限。如何高效提取天然多糖-多酚偶联物成为了目前研究的热点。提取方式主要有传统提取方法和绿色提取方法,传统提取方法包括水提取法、碱提取法、酶辅助萃取法、超声辅助提取法、微波辅助提取法等,绿色提取方法包括加压液萃取等方法,其提取率与原料的种类、生长环境、部位、收获季节等有关。分离纯化方法与多糖相似,主要常用的分离纯化方式为阴离子交换层析法和凝胶过滤层析法。其结构也比较复杂,目前主要通过高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、紫外-可见(ultraviolet-visible, UV-vis)光谱、傅里叶红外光谱(fourier-transform infrared, FT-IR)和核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)等方法对多糖-多酚偶联物结构进行表征。天然多糖-多酚偶联物还具有多种生物活性,如抗炎^[7]、抗氧化^[8]、抗凝血^[9]、辐射保护^[10]、抗血小板^[11]、抗糖尿病^[12]等,在食品、医药、化妆品等领域有着广泛的应用前景,但由于其成分复杂,提取工艺杂乱,其潜在的生物活性与功能尚未完全明确。这为科研工作者提供了新的研究方

向和机会,对于新型功能食品的开发、药物研发、化妆品与保健品等方面研究具有重要的研究意义。本文对天然多糖-多酚偶联物不同的提取、分离纯化方式和生物活性的研究进展进行了综述并对其进行了展望。

1 天然多糖-多酚偶联物的提取分离纯化方法

1.1 天然多糖-多酚偶联物的提取

不同的提取方法对多糖-多酚偶联物的提取率以及生物活性都有着显著的影响,进而影响偶联物在不同领域的应用前景,天然多糖-多酚偶联物目前的提取方法主要有传统提取方法和新型绿色提取方法,其中传统方法包括水提取法、碱提取法、酶辅助萃取法、超声辅助提取法、微波辅助碱提法等,新型绿色提取方法主要是加压液萃取。表 1 为常见的天然多糖-多酚偶联物的提取方法及优缺点。

1.1.1 水提法 水提法是常用的提取方法,该方法操作简便,成本低,不需要过多的步骤,试剂安全,但天然多糖-多酚偶联物使用水提法较少。有研究学者以水提法为基础采用不同的干燥方式对秋葵^[13]和蒲公英^[14]中的多糖进行提取,证明多糖中含有酚类物质,提取率分别为 10.85%±0.31%~13.80%±0.18%, 8.26%±0.55%~10.77%±0.92%,说明水提法中原料的种类和干燥方式对提取率有明显的影响。刘雯^[15]、Wu 等^[16]分别对拐枣中多糖-蛋白质-多酚偶联物进行提取,提取率在 2.61%±0.07%~5.20%±0.14% 之间,水提取法的提取率高于微波辅助水提取法(2.16%±0.20%)^[15],可能是由于微波使多糖-多酚偶联物发生降解导致的。

表 1 天然多糖-多酚偶联物的提取方法

Table 1 Extraction method of natural polysaccharide-polyphenol conjugates

方法	优点	缺点	提取条件	参考文献
水提取法	操作简单,试剂安全	提取率低,所需时间长,能耗高,适用于提取多糖	固液比1:30(g:mL), 95 ℃提取3 h	刘雯 ^[15]
碱提法	所需时间短,提取率高,适用范围广	部分多糖在碱性条件下会发生降解,从而降低产品的颜色、风味,操作复杂	料液比1:10(g:mL), 室温NaOH溶液中悬浮24 h	Liu等 ^[29]
酶辅助萃取法	提取率高,反应条件温和,专一性、高效性	成本高,酶的稳定性较差,容易失活	纤维素酶20 mg, 料液比1:5(g:mL), 提取温度50 ℃, 提取时间50 min	Li等 ^[22]
超声辅助提取法	提取时间短,提取率高,能耗低	所需成本高,操作要求高	料液比1:62(g:mL), 提取温度80 ℃, 超声时间37 min	郭雷等 ^[30]
微波辅助碱提法	热量分布均匀,可控性、重复性	成本高,能耗高	料液比1:10(g:mL), 提取温度80 ℃, 微波时间20 min	Pawlaczyk-Graja等 ^[19]
加压液萃取	毒性小,操作安全,时间短,能耗低	适用范围较小	提取溶剂水和60%乙醇, 提取温度150 ℃和200 ℃, 流速5和10 mL/min	Ho等 ^[27]

1.1.2 碱提法 碱提法与水提法相比,不仅节约了生产时间,提高了产率,而且该方法可以应用于各种不同类型的多糖-多酚偶联物的提取,适用范围广泛。部分含糖醛酸及酸性多糖在碱性环境中具有更好的稳定性,能有效地提高多糖的提取率^[17],但操作较为复杂。药用植物中的天然多糖-多酚偶联物一般采用碱提法,有学者采用碱提法对紫锥菊^[18]、野草莓叶^[19]、龙须草^[20]中多糖-多酚偶联物进行提取,提取率分别为2.1%、7.7%、3.1%,在野草莓叶中碱提法的提取率高于超声辅助碱性提取(4.9%)和微波辅助碱性提取(6.7%),这可能是由于超声和微波使偶联物发生降解导致的。

1.1.3 酶辅助提取法 与其他方法相比,酶具有专一性和高效性^[21],但是成本较高,稳定性较差,容易失活,需要严格控制操作条件,同时还需要注意酶的储存和运输。Li等^[22]通过酶解对羊栖菜中的多糖-多酚偶联物进行提取,利用不同浓度的乙醇进行分级醇沉,最终得到两种多糖-多酚偶联物(PPC1和PPC2),提取率分别为24.22%±3.78%,11.87%±2.33%,明显高于水提取法,这是由于酶具有破坏植物细胞壁的能力,从而促进多糖-多酚偶联物的释放。

1.1.4 超声波与微波辅助碱提取法 超声波辅助提取法和微波辅助提取法可以有效提高多糖、多酚含量。超声波的空化作用和振动作用可以有效地破碎植物细胞壁^[23],使多酚多糖更容易释放出来,从而提高了提取效率。同时由于超声波的强大破碎作用,可以大大缩短提取时间,减少能源的消耗。由于微波的热量分布均匀,可以实现自动化控制^[24],提高提取过程的可控性和可重复性,避免对样品的局部过热和过分的机械搅拌,Pawlaczyk-Graja等^[19]分别采用超声波和微波对野草莓叶中天然多糖-多酚偶联物进行提取,提取率分别为4.9%、6.7%,超声波辅助提取方法与传统水提法相比,虽然提取率没有明显的变化,但缩短了提取时间,提高了提取效率。

1.1.5 加压液萃取 加压液萃取是新型的绿色提取技术,主要利用水作为一种可用的资源和环境友好型溶剂,已显示出取代传统技术的潜力^[25]。与传统方法相比,该方法毒性溶剂少,操作安全,易于放大、时间短、能耗小。但是加压液萃取需要特殊的设备来承受高温高压且操作条件严格,适用范围较小,适用于常规方法难以提取的偶联物。Campos等^[26]采用加压热水萃取方法提取葡萄皮渣中的多糖-多酚偶联物,提取温度为120℃和95℃,该方法提取得到的总酚含量(427 μg/mg GAE)高于固液萃取法。Ho等^[27]采用加压液萃取技术对植物中天然多糖-多酚偶联物进行提取,提取溶剂为水和60%乙醇,提取温度为150℃和200℃,流速为5和10 mL/min。产率在2.76%~14.34%之间,与传统方法相比,提取率没有明显变化,这是由于加压液萃取通常在较高的温度下进行,可以降解更多的多糖。这导致形成低分子

量化合物,如葡萄糖和其他糖类^[28],导致透析后的最终产率下降。

1.2 天然多糖-多酚偶联物的分离纯化

采用不同方法提取的多糖-多酚偶联物中含有较多的杂质,如蛋白质、色素等杂质,不仅对偶联物的纯度产生影响,也会为后续结构和生物活性的研究带来影响,目前对多糖-多酚偶联物的分离纯化是非常重要的,常用的植物多糖-多酚偶联物的纯化方法有阴离子交换层析法^[31]和凝胶过滤层析法^[32]。

阴离子交换层析法纯化共价物主要是基于共价物的不同离子性质分离,常用的阴离子交换层析柱的类型有DEAE-纤维素、DEAE-Sephadex、DEAE-Sephadex等^[33]。具有分离效果好,不破坏多糖等大分子结构的特点,但价格昂贵,平衡时间长。李思雨等^[34]采用DEAE-52纤维柱层析法对小球藻胞内粗多糖进行分离纯化,得到5个组分(CIP-1、CIP-2、CIP-3、CIP-4、CIP-5),证明CIP-1组分为中性多糖,其余4个组分为酸性多糖。李荣蓉等^[35]采用DEAE-Sephadex FF弱阴离子交换柱层析法对褐藻糖胶进行分离纯化,得到了3个均一组分(D-1、D-2、D-3),证明D-1为流出峰,D-2、D-3为盐洗脱峰,Pawlaczyk等^[36]采用DEAE-Sephadex A50柱对千屈菜中的多糖-多酚偶联物进行分离纯化,通过梯度洗脱,分离得到12个组分(LsF1~LsF12),并对每个组分中的多酚、多糖含量进行测定。

凝胶过滤层析法是基于结合物的分子大小分离^[37],常用的凝胶过滤层析柱的类型有Sephadex和Sephadex,该方法设备简单,易于操作,条件温和,适用范围广,但上样量不宜太大,需严格控制流速。Tsirigotis-Maniecka等^[20]采用凝胶过滤色谱法对龙须草中的多糖-多酚偶联物进行分离纯化,得到一个多糖-多酚偶联物组分,这可能表明龙须草的两种成分都以偶联物的形式存在。李思雨等^[34]在DEAE-52纤维柱的基础上,采用葡聚糖凝胶柱Sephadex G-100进一步分离纯化,得到的洗脱曲线峰型相对对称且单一,表明纯化效果良好。

2 多糖-多酚偶联物的结构表征

多糖-多酚偶联物的结构较为复杂,主要由多酚基团和多糖骨架组成,多酚的分子量大小和不同的多糖侧链对多糖-多酚偶联物的相互作用有一定的影响,使偶联物的结构难以完全表征,要对其结构进行分析,可用比色法对多糖-多酚偶联物进行简单的化学成分测定,用苯酚-硫酸法^[38]测定总糖含量,以葡萄糖为标准品。采用Folin-Ciocalteu法^[39]测定多酚含量,以没食子酸为标准品。用间羟基联苯法^[40]测定糖醛酸含量,以半乳糖醛酸为标准品。通过高效液相色谱(HPLC)、气相色谱-质谱(GC-MS)、紫外-可见光谱(UV-vis)、傅里叶红外光谱(FT-IR)和核磁共振(NMR)等仪器可对多糖-多酚偶联物进行进一步的表征。

2.1 高效液相色谱法(HPLC)

通过高效液相色谱(HPLC)法峰的数目和形状对偶联物组分的纯度进行分析^[41],可以实现自动化进样,适用范围较广,分析速度快,分离效果高于传统的色谱法,但设备价格昂贵,操作复杂,需要多种溶剂作流动相。Wang 等^[42]为了分析水稻秸秆可溶性多糖中的寡糖-酚类化合物偶联物中酚类化合物的组成,采用了高效液相色谱法(HPLC)进行了分析,通过不同分子量观察到了没食子酸、儿茶素、邻苯二甲酸、香草酸、胡萝卜酸、香草醛、对香豆酸、阿魏酸、4-乙基苯酚和 4-乙基愈创木酚的存在。Pawlaczyk 等^[43]采用高效液相色谱法(HPLC)对药用植物中的多糖-多酚偶联物进行结构表征,确定了偶联物中的单糖种类,并与气-液色谱-质谱法(gas-liquid chromatography-mass spectrometry, GLC-MS)联用,确定了其含量。

2.2 气相色谱-质谱(GC-MS)法

气相色谱-质谱(GC-MS)法是把气相色谱法和质谱法结合起来的一种分析方法,该法灵敏度较高,可用于鉴定多糖糖苷键结构^[44],但由于设备昂贵,操作复杂限制了气相色谱-质谱法的普及和应用。Sellimi 等^[45]采用气相色谱-质谱(GC-MS)法对海藻中多酚-蛋白-多糖三元复合物进行分析,结果表明结合多糖主要由半乳糖(34.02%)、岩藻糖(26.25%)和甘露醇(21.25%)组成,并含有少量的葡萄糖(5.78%)、鼠李糖(4.9%)、木糖(3.22%)和甘露糖(2.22%)。Hajji 等^[46]利用气相色谱-质谱(GC-MS)法对金龟子根皮中多糖的结构进行了表征,确定了单糖残基的连接模式。

2.3 紫外-可见光谱(UV-vis)

紫外-可见光谱(UV-vis)是一种常用的测定多糖-多酚偶联物的方法,可以通过吸收峰对偶联物的结构进行表征。紫外-可见光谱(UV-vis)适用性广,操作简单,灵敏度和准确度较高,但是其购买与维护成本较高。Orazio 等^[47]采用紫外-可见光谱(UV-vis)对葡聚糖-儿茶素偶联物进行表征,通过吸收峰证实了儿茶素对葡聚糖进行了共价修饰,形成了葡聚糖-儿茶素偶联物。Campos 等^[26]通过紫外-可见光谱(UV-vis)对葡萄皮渣多酚-多糖偶联物进行表征,在谱带上观察到了酚类化合物的芳香结构(芳香环的 C=C 键)的存在,证实了葡萄皮渣中多糖与多酚的共价结合。

2.4 傅里叶红外光谱(FT-IR)

傅里叶红外光谱(FT-IR)主要鉴定多糖-多酚偶联物中的官能团,偶联物保留了多糖骨架的红外波段,并进一步显示了多酚类化合物的特征性 C=C 拉伸振动。与传统的分光光谱仪相比,傅里叶红外光谱(FT-IR)扫描速度快,覆盖范围广,适用于不同样品的分析,但设备昂贵,对样品的制备要求较高,例如对空白样品需要压至透明且要快速检测。Marilia 等^[48]

通过傅里叶红外光谱(FT-IR)对没食子酸-海带多糖偶联物进行表征,在条带上证实了有没食子酸的存在,说明没食子酸与海带多糖成功结合。Guo 等^[49]利用傅里叶红外光谱(FT-IR)对从小麦麸皮中提取的碱性阿拉伯木聚糖进行了结构表征,成功合成了自由基催化的阿拉伯木聚糖-儿茶素(arabinoxylan-catechin, AX-CA)偶联物。

2.5 核磁共振(NMR)

核磁共振(NMR)可用于测定多糖、多酚的偶联位置,具有高分辨度和清晰度,在多个领域具有广泛的应用前景,但价格昂贵,需要较长的检测时间。Ho 等^[27]采用核磁共振(NMR)对山壳骨(钩粉草)多酚-多糖偶联物进行结构表征,检测出了三个可见信号区域,其中 $\delta 7.5 \sim 6.5$ ppm 区域的强信号主要是酚类片段的芳香部分。Pawlaczyk-Graja 等^[19]通过核磁共振(NMR)对野草莓叶中的多酚-多糖偶联物进行表征,在 ^1H NMR 谱中 $\delta 8 \sim 6$ ppm 左右的区域检测到酚类结构的芳香族部分。此外,在 $\delta 3.2$ 和 5.5 ppm 之间,碳水化合物组分的峰特征非常明显。Yong 等^[50]利用了薄层色谱(thin-layer chromatography, TLC)、荧光光谱(fluorescence spectroscopy)、扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)和凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography, GPC)等方法对多糖-儿茶素偶联物的结构进行了进一步的表征。

3 多糖-多酚偶联物的生物活性

3.1 抗氧化作用

多糖和多酚均可以有效的对抗自由基,具有天然的抗氧化作用。然而关于多糖-多酚偶联物的抗氧化能力研究较少。Kolodziejczyk-Czepas 等^[51]通过洋甘菊中多糖-多酚偶联物对 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除能力、等离子体的铁还原能力(FRAP)的测定显示,洋甘菊中多糖-多酚偶联物可以有效地清除自由基、抑制氧化应激、增强铁的还原能力,与洋甘菊一起预先培养血浆可显著降低 ONOO⁻诱导的氧化修饰的程度,以及脂质氢过氧化物的形成,说明从洋甘菊中分离的多糖-多酚偶联物具有抗氧化作用。Olennikov 等^[52]对越橘中多糖-多酚偶联物进行体外和体内抗氧化实验,证明了多糖-多酚偶联物抗氧化能力主要是由于多糖-多酚偶联物能够清除自由基、氮氧化物、过氧化氢和具有螯合铁离子的能力。其主要原因是多糖-多酚偶联物能够提供氢,与由氧化反应生成的自由基结合,并通过电子传递来清除自由基,减少细胞的氧化损伤,同时还可以通过提高抗氧化酶的活性和表达水平,增强细胞的抗氧化能力,从而保护细胞免受氧化应激的损伤^[53]。

3.2 抗炎作用

多糖和多酚是食品中天然存在的化合物,可以有效的抑制炎症反应。炎症反应是机体内一种重要的自我防御机制,是由一系列的传感器和效应器介导

的,包括受体、信号级联和分泌的效应器蛋白^[54]。Peng等^[55]对莲藕中多糖-没食子酸/表没食子儿茶素(lotus root Polysaccharide-gallic acid/epigallocatechin, LRP-GA/EGC)偶联物对巨噬细胞抗炎细胞因子IL-10进行研究,通过抑制促炎因子形成的机制,如肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-1 β (IL-1 β)等^[56],表明了没食子酸(gallic acid, GA)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)与莲藕多糖(lotus root Polysaccharide, LRP)联合可促进巨噬细胞NO的生成,对脂多糖(liposaccharide, LPS)刺激的NO过量产生有抑制作用。与多糖(LRP)相比,多糖-没食子酸/表没食子儿茶素(LRP-GA/EGC)明显提高了抗炎细胞因子IL-10的表达,表明多糖-多酚偶联物具有良好的抗炎作用。Ahn等^[57]研究了没食子酸接枝壳聚糖(gallic acid-grafted-chitosan, GAC)对脂多糖(LPS)刺激的RAW264.7巨噬细胞的抗炎作用,在脂多糖刺激的RAW264.7巨噬细胞中,没食子酸接枝的壳聚糖可降低诱导型NO合成酶和环氧合酶-2的表达,抑制NO和前列腺素E₂(prostaglandin E₂, PGE₂)的产生。没食子酸接枝壳聚糖的抗炎作用可以通过丝裂原激活的蛋白激酶信号通路下调转录因子(核因子 κ B和激活蛋白-1)来实现。这些炎症因子是炎症反应的重要介质,抑制它们的产生可以有效减轻炎症症状,阻断炎症介质的释放。同时,多糖可以抑制炎症信号通路的激活,如核因子- κ B(NF- κ B)通路,从而抑制炎症反应的发生^[58]。

3.3 辐射保护作用

多糖和多酚可以有效的抵御辐射损伤。电离辐射广泛应用于食品原料和设备的医学影像诊断、放疗、辐射灭菌等领域,促进了医疗和食品工业的发展,同时也带来了一些不可忽视的负面影响,辐射保护是一种重要的安全措施,它可以有效地防止辐射对人体造成的伤害。Zbikowska等^[59]研究了来自蔷薇科和菊科的多糖-多酚偶联物对辐射致人外周血淋巴细胞的毒性,在 γ 射线照射之前,若先用该偶联物处理血浆,能够明显抑制脂质过氧化,同时也可以防止低剂量(100 Gy)辐射引起的蛋白质氧化。偶联物的预处理缓解了淋巴细胞的DNA氧化损伤和脂质过氧化,并且在一定程度上恢复了超氧化物歧化酶和S-谷胱甘肽转移酶的活性。Szejka等^[60]的研究结果同样表明了多糖-多酚偶联物具有一定的辐射保护作用,可作为一种新型的防辐射防护剂。它可以提高机体对外界辐射的抵抗力,帮助消除辐射引起的炎症反应^[61]。因此,多糖-多酚偶联物对于缓解辐射对人体的损伤具有重要作用。

3.4 抗凝血作用

多糖和多酚可以与体内的凝血因子相互作用,具有明显的抗凝血作用。抗凝血作用是一种重要的生理功能,它可以帮助维持血液的稳定性、防止血栓形成、促进血液循环、预防血栓形成和降低心血管等

疾病的风险。Khoo等^[62]研究了带负电荷的多糖-多酚偶联物在内源性途径中延长了血液凝固时间,同样Pawlaczyk等^[63]研究表明含量高的半乳糖醛酸和酚类化合物的偶联物的抗凝血活性较好。糖醛酸和酚类物质的存在提供了聚电解质的性质,Pawlaczyk等^[36]从千屈菜多糖-多酚偶联物中分离出12个组分,部分组分中含有与肝素相似抗凝血活性的糖醛酸和酚类物质,并通过活化部分凝血活酶时间试验(aPTT)和凝血酶原时间试验(PT)表明了这些组分可以抑制血浆凝块的形成,从而使多糖-多酚偶联物具有抗凝血作用。

3.5 抗血小板作用

多糖和多酚具有明显的抗血小板聚集能力,多糖-多酚偶联物更是一种天然的抗血小板活性物质,它能够抑制血小板聚集,减少血栓形成,从而起到预防心血管疾病的作用。Bijak等^[64]研究表明,从洋甘菊中分离的多糖-多酚偶联物对二磷酸腺苷(adenosine diphosphate, ADP)、胶原蛋白和花生四烯酸等多种激动剂诱导的血小板聚集有影响。在富血小板血浆的治疗中,多酚-多糖偶联物展现出一种剂量依赖性关系,即随着其浓度的增加,对血小板聚集的抑制作用也相应增强。这说明偶联物通过多种机制对血小板聚集有明显抑制作用。Pawlaczyk-Graja等^[65]研究加拿大灯笼花中多糖-多酚偶联物的抗血小板作用,但仅限于花生四烯酸诱导的环加氧酶途径,其工作原理可能是阻止血小板和内皮细胞粘连,从而避免动脉粥样硬化斑块形成^[18],这些研究表明多糖-多酚偶联物具有抗血小板作用。

3.6 降血糖作用

多糖和多酚在降血糖方面表现出明显的潜力,糖尿病是一种以机体内血糖值偏高为症状的慢性代谢性疾病^[66]。糖尿病对人体健康的危害不仅仅在其本身,它还会引起多种并发症,如动脉粥样硬化、糖尿病病足、因视神经损伤而导致的视力下降甚至失明等^[67]。多酚类化合物和植物多糖均可通过抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性来影响淀粉消化率^[68]和葡萄糖在血液中的释放速度,从而达到降血糖作用。为此,Campos等^[26]研究表明从葡萄渣中提取的多糖-多酚偶联物显示出较高降低 α -淀粉酶活性的能力,由于多酚与具有支链侧链的多糖结合能够减弱葡萄糖通过Caco-2人细胞单层的转运,表现出降血糖的潜力。Zhu等^[69]通过制备儿茶素-g-壳聚糖偶联物,证明了儿茶素-g-壳聚糖偶联物对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶均有抑制作用,且明显高于儿茶素和壳聚糖,说明儿茶素和壳聚糖对糖苷酶和淀粉酶的抑制具有协同作用。Zeng等^[70]制备的单宁-菊粉偶联物通过静态猝灭机制猝灭 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的荧光,且偶联物的降血糖活性高于菊粉,说明偶联物具有更好的降血糖活性。目前,对于天然多糖-多酚偶联物降血糖机制尚不明确,未来可进行体内试验。

4 结论与展望

综上所述,多糖-多酚偶联物有多种不同的提取方法,每种提取方法都有各自的优缺点,应根据样品的性质和特征选择适宜的提取方法。此外,多糖-多酚偶联物还可以有效地抵抗疾病和改善身体健康。这种偶联物通常具有多种功能,包括增强免疫系统、改善血液循环和保护肝脏等。近年来,人们对天然多糖-多酚偶联物的研究逐渐增多,但目前,对天然多糖-多酚偶联物的研究主要集中在陆生植物中,多酚-多糖的相互作用可能影响植物性食品的理化、功能和生理特性,如消化率、生物利用度和稳定性。

多糖-多酚偶联物广泛存在于水果、蔬菜等食品中,是人们日常生活中的重要组成部分,但由于其产量有限且结构复杂,目前对其的研究还很有限,还需在以下几个方面进行深入研究,首先,传统提取方式提取时间长,耗能高,所需试剂量较大;绿色提取方式较少,应利用现代技术不断优化多糖-多酚偶联物的提取分离技术,提高提取率,以便更好的深入研究。然后,由于天然多糖-多酚偶联物的复杂性及相互作用,在分离纯化时难以得到高纯度的产物,且可能破坏了偶联物的结构,影响最终产率,研究学者应不断开发新的分离纯化方法,提高偶联物的纯度。其次,多种仪器已用于表征天然多糖-多酚偶联物的结构,但具体结合方式尚不明确,未来可利用原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)、透射电镜(transmission electron microscopic, TEM)等技术对其结构进行全面解析。最后,天然多糖-多酚偶联物生物活性多样,但人体吸收机制及具体功效未明。未来的研究将揭示其潜力,推动在食品与药物领域应用。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 李金凤,叶发银,赵国华. 多糖-酚酸缀合物的合成及特性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(2): 245–251. [LI Jinfeng, YE Fayin, ZHAO Guohua. Synthesis and characterization of polysaccharide-phenolic acid conjugates[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(2): 245–251.]
- [2] 王丽颖,李福香,杨雅轩,等. 多糖与多酚相互作用机制及其对多酚特性的影响研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 276–282. [WANG Liying, LI Fuxiang, YANG Yaxuan, et al. Interaction mechanism between polyphenols and polysaccharides and effect on polyphenolic properties: A review[J]. Food Science, 2017, 38(11): 276–282.]
- [3] JESUMANI V, DU H, PEI P, et al. Comparative study on skin protection activity of polyphenol-rich extract and polysaccharide-rich extract from *Sargassum vachellianum*[J]. PLoS One, 2020, 15(1): e0227308.
- [4] PANIĆ M, STOJKOVIĆ M R, KRALJIĆ K, et al. Ready-to-use green polyphenolic extracts from food by-products[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 628–636.
- [5] LEE Z J, XIE C, NG K, et al. Unraveling the bioactive interplay: Seaweed polysaccharide, polyphenol and their gut modulation effect[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 65(2), 382–405.
- [6] ZHAO W R, SUBBIAH V, XIE C D, et al. Bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in seaweed[J]. Food Reviews International, 2023, 39(8): 5729–5760.
- [7] YUAN D, LI C, HUANG Q, et al. Current advances in the anti-inflammatory effects and mechanisms of natural polysaccharides[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(22): 5890–5910.
- [8] FERNANDES P A R, COIMBRA M A. The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120965.
- [9] PAWLACZYK-GRAJA I, BALICKI S, ZIEWIECKI R, et al. Polyphenolic-polysaccharide conjugates of *Sanguisorba officinalis* L. with anticoagulant activity mediated mainly by heparin cofactor II[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93: 1019–1029.
- [10] ZVYAGINTSEVA T N, USOLTSEVA R V, SHEVCHENKO N M, et al. Structural diversity of fucoidans and their radio-protective effect[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 273: 118551.
- [11] PAWLACZYK I, CZERCHAWSKI L, KULICZKOWSKI W, et al. Anticoagulant and anti-platelet activity of polyphenolic-polysaccharide preparation isolated from the medicinal plant *Erigeron canadensis* L[J]. Thrombosis Research, 2011, 127(4): 328–340.
- [12] ZHANG W T, SUN J, LI Q, et al. Free radical-mediated grafting of natural polysaccharides such as chitosan, starch, inulin, and pectin with some polyphenols: Synthesis, structural characterization, bioactivities, and applications-A review[J]. Foods, 2023, 12(19): 3688.
- [13] YUAN Q, HE Y, XIANG P Y, et al. Influences of different drying methods on the structural characteristics and multiple bioactivities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147: 1053–1063.
- [14] LI F, FENG K L, YANG J C, et al. Polysaccharides from dandelion (*Taraxacum mongolicum*) leaves: Insights into innovative drying techniques on their structural characteristics and biological activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 167: 995–1005.
- [15] 刘雯. 干燥及提取方式对拐枣多酚-蛋白-多糖复合物的理化性质及活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021. [LIU Wen. Effects of drying methods and extraction methods on the physicochemical characteristics and bioactivities of polyphenolic-protein-polysaccharide complexes from *Hovenia dulcis* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021.]
- [16] WU D T, LIU W, XIAN M L, et al. Polyphenolic-protein-polysaccharide complexes from *Hovenia dulcis*: Insights into extraction methods on their physicochemical properties and *in vitro* bioactivities[J]. Foods, 2020, 9(4): 456.
- [17] 李丹丹,吴茂玉,于滨,等. 枸杞多糖的制备、结构与生理活性研究进展[J]. 食品工业, 2013, 34(8): 203–207. [LI Dandan, WU Maoyu, YU Bin, et al. Progress in structure and physiological activity of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. The Food Industry, 2013, 34(8): 203–207.]
- [18] 乔晋丽. 紫锥菊多酚多糖共价物的结构及生物活性研究

- [D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [QIAO Jinli. Structural characterization and bioactivity of polyphenol-polysaccharide conjugates from *Echinacea purpurea* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.]
- [19] PAWLACZYK-GRAJA I, BALICKI S, WILK K A. Effect of various extraction methods on the structure of polyphenolic-polysaccharide conjugates from *Fragaria vesca* L. leaf[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 664–674.
- [20] TSIRIGOTIS-MANIECKA M, PAWLACZYK-GRAJA I, ZIEWIECKI R, et al. The polyphenolic-polysaccharide complex of *Agrimonia eupatoria* L. as an indirect thrombin inhibitor-isolation and chemical characterization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 125: 124–132.
- [21] GLIGOR O, MOCAN A, MOLDOVAN C, et al. Enzyme-assisted extractions of polyphenols—A comprehensive review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 302–315.
- [22] LI S K, HE Y H, ZHONG S Y, et al. Antioxidant and anti-aging properties of polyphenol-polysaccharide complex extract from *Hizikia fusiforme* [J]. *Foods*, 2023, 12(20): 3725.
- [23] 孙海燕. 天麻多酚的超声辅助提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(10): 158–163. [SUN Haiyan. Optimization of process of polyphenols from *Gastonia elata* BI and its antioxidant activity[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(10): 158–163.]
- [24] 白宇峰, 盖红辉, 陈涛, 等. 茶多酚提取的研究现状[J]. *黑龙江科技信息*, 2016(25): 19. [BAI Yufeng, GAI Honghui, CHEN Tao, et al. Research status on extraction of tea polyphenols[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2016(25): 19.]
- [25] PLAZA M, MARINA M L. Pressurized hot water extraction of bioactives[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 76: 117201.
- [26] CAMPOS F, PEIXOTO A F, FERNANDES P A, et al. The antidiabetic effect of grape pomace polysaccharide-polyphenol complexes[J]. *Nutrients*, 2021, 13(12): 4495.
- [27] HO T C, KIDDANE A T, SIVAGNANAM S P, et al. Green extraction of polyphenolic-polysaccharide conjugates from *Pseuderanthemum palatiferum* (Nees) Radlk: Chemical profile and anticoagulant activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 157: 484–493.
- [28] TOOR S S, ROSENDAHL L, RUDOLF A. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 2328–2342.
- [29] LIU J, BAI R Y, LIU Y P, et al. Isolation, structural characterization and bioactivities of naturally occurring polysaccharide-polyphenolic conjugates from medicinal plants—A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 2242–2250.
- [30] 郭雷, 郭家才, 郑洪伟. 花果山云雾茶中多酚和多糖的超声同步提取工艺[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(16): 33–39. [GUO Lei, GUO Jiakai, ZHENG Hongwei. Ultrasonic-assisted synchronous extraction process of tea polyphenols and polysaccharides from huaguoshan yunwu tea[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(16): 33–39.]
- [31] ZHANG H, ZOU P, ZHAO H T, et al. Isolation, purification, structure and antioxidant activity of polysaccharide from pinecones of *Pinus koraiensis* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 251: 117078.
- [32] 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.
- [33] 宋海燕. 鹿角菜中岩藻多糖提取、分离纯化及其免疫活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017. [SONG Haiyan. Study on extraction, isolation, purification and immunological activity of fucoidan from *Pelvetia siliquosa* tsenget C. F. chang [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.]
- [34] 李思雨, 刘松, 刘红全, 等. 小球藻多糖改性及抗氧化研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(8): 200–206. [LI Siyu, LIU Song, LIU Hongquan, et al. Study on modification and antioxidation of *Chlorella* polysaccharide[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(8): 200–206.]
- [35] 李荣蓉, 付燕红, 赵紫涵, 等. 海带褐藻糖胶的分离纯化及其抗氧化活性测定[J]. *农产品加工*, 2022(2): 47–51, 56. [LI Rongrong, FU Yanhong, ZHAO Zihan, et al. Separation and purification of fucoidan in *Laminaria japonica*. and determination of antioxidant activity[J]. *Farm Products Processing*, 2022(2): 47–51, 56.]
- [36] PAWLACZYK I, CAPEK P, CZERCHAWSKI L, et al. An anticoagulant effect and chemical characterization of *Lythrum salicaria* L. glycoconjugates[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(1): 277–284.
- [37] ÓFÁGÁIN C, CUMMINS P M, O'CONNOR B F. Gel-filtration chromatography[J]. *Protein Chromatography: Methods and Protocols*, 2017: 15–25.
- [38] YUE F F, ZHANG J R, XU J X, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 963318.
- [39] 付稼榕, 徐荣, 郭刚军, 等. 单因素结合响应面法优化魔芋多酚含量测定方法[J]. *食品工业*, 2023, 44(6): 299–304. [FU Garong, XU Rong, GUO Gangjun, et al. Optimization of content determination method of polyphenols from konjac by single factor and response surface methodology[J]. *The Food Industry*, 2023, 44(6): 299–304.]
- [40] 李亚平, 周鸿立. 多糖中糖醛酸含量测定方法的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 49(17): 207–211. [LI Yaping, ZHOU Hongli. Progress on determination content of uronic acid in polysaccharides[J]. *Food Research and Development*, 2019, 49(17): 207–211.]
- [41] 李欣欣, 李文香. 桦褐孔菌多糖的分离纯化及其抗氧化活性测定[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 192–197. [LI Xinxin, LI Wenxiang. Isolation, purification and antioxidant activity of *Inonotus obliquus* polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(11): 192–197.]
- [42] WANG Y Z, ZHENG J, MUHAMMAD N, et al. Oligosaccharide-phenolic compound conjugates in soluble polysaccharides from rice straw alleviate ethanol fermentation stresses in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 181: 114782.
- [43] PAWLACZYK I, CZERCHAWSKI L, PILECKI W, et al. Polyphenolic-polysaccharide compounds from selected medicinal plants of *Asteraceae* and *Rosaceae* families: Chemical characterization and blood anticoagulant activity[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3): 568–575.
- [44] 景永帅, 马云凤, 李明松, 等. 植物多糖结构解析方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(3): 411–421. [JING Yongshuai, MA Yunfeng, LI Mingsong, et al. Research progress in analytical methods for structures of phytogenic polysaccharides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(3): 411–421.]
- [45] SELLIMI S, BENSLIMA A, BARRAGAN-MONTERO V,

- et al. Polyphenolic-protein-polysaccharide ternary conjugates from *Cystoseira barbata* Tunisian seaweed as potential biopreservatives: Chemical, antioxidant and antimicrobial properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 105: 1375–1383.
- [46] HAJJI M, HAMDI M, SELLIMI S, et al. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of a novel polysaccharide from *Periploca laevigata* root barks[J]. *Carbohydrate polymers*, 2019, 206: 380–388.
- [47] ORAZIO V, GIUSEPPE C, FRANCESCA I, et al. Dextran-catechin conjugate: A potential treatment against the pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Pharmaceutical Research*, 2012, 29: 2601–2614.
- [48] MARÍLIA M F N, LUCAS A N C B, RONY S V, et al. Gallic acid-laminarin conjugate is a better antioxidant than sulfated or carboxylated laminarin[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(12): 1192.
- [49] GUO Q B, XIAO X Y, LI C R, et al. Catechin-grafted arabinoxylan conjugate: Preparation, structural characterization and property investigation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 796–805.
- [50] YONG H M, LIU J. Polysaccharide-catechin conjugates: Synthesis methods, structural characteristics, physicochemical properties, bioactivities and potential applications in food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 145: 104353.
- [51] KOŁODZIEJCZYK-CZEPAS J, BIJAK M, SALUK J, et al. Radical scavenging and antioxidant effects of *Matricaria chamomilla* polyphenolic-polysaccharide conjugates[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 72: 1152–1158.
- [52] OLENNIKOV D N, CHEMPOSOV V V, CHIRIKOVA N K. Polymeric compounds of lingonberry waste: Characterization of antioxidant and hypolipidemic polysaccharides and polyphenol-polysaccharide conjugates from *Vaccinium vitis-idaea* press cake[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2801.
- [53] 陈宇, 郑彦楷, 李大彪, 等. 植物多糖对内质网应激介导的动物细胞凋亡、炎症和氧化损伤的影响及其作用机制[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(12): 7641–7647. [CHEN Yu, ZHENG Yankai, LI Dabiao, et al. Effects of plant polysaccharides on endoplasmic reticulum stress-mediated apoptosis, inflammation and oxidative damage of animal cells and their mechanisms[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(12): 7641–7647.]
- [54] 黄齐齐, 房韬文, 罗怡雯, 等. 甘蔗多酚提取、纯化及生物活性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 45(9): 389–398. [HUANG Qiqi, FANG Taowen, LUO Yiwen, et al. Research progress on extraction, purification and biological activities of sugarcane polyphenols[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 45(9): 389–398.]
- [55] PENG K D, LI Y, SUN Y, et al. Lotus root polysaccharide-phenol complexes: Interaction, structure, antioxidant, and anti-inflammatory activities[J]. *Foods*, 2023, 12(3): 577.
- [56] 贺水花, 杨玲. 新疆特色植物药桑多酚的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(20): 167–172. [HE Shuihua, YANG Ling. Research progress on polyphenols from *Morus nigra* L. in Xinjiang[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(20): 167–172.]
- [57] AHN C B, JUNG W K, PARK S J, et al. Gallic acid-g-chitosan modulates inflammatory responses in LPS-stimulated RAW264. 7 cells via NF- κ B, AP-1, and MAPK pathways[J]. *Inflammation*, 2016, 39: 366–374.
- [58] 乔芊芊. 蛇莓提取物体外抑菌、抗氧化、抗炎活性的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [QIAO Qianqian. Study on antibacterial, antioxidant and anti-inflammatory activities of extracts from *Duchesnea indica* (andr.) focke *in vitro*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [59] ZBIKOWSKA H M, SZEJK M, SALUK J, et al. Polyphenolic-polysaccharide conjugates from plants of *Rosaceae*/*Asteraceae* family as potential radioprotectors[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 86: 329–337.
- [60] SZEJK M, POPLAWSKI T, CZUBATKA-BIENKOWSKA A, et al. A comparative study on the radioprotective potential of the polyphenolic glycoconjugates from medicinal plants of *Rosaceae* and *Asteraceae* families versus their aglycones[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2017, 171: 50–57.
- [61] 李辉, 王振宇, 白海娜. 多酚类化合物电离辐射防护研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 384–388, 399. [LI Hui, WANG Zhenyu, BAI Haina. The progress of radioprotective effect of polyphenol compounds against ionizing radiation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(14): 384–388, 399.]
- [62] KHOO L T, ABAS F, ABDULLAH J O, et al. Anticoagulant activity of polyphenolic-polysaccharides isolated from *Melastoma malabathricum* L[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, 2014: 614273.
- [63] PAWLACZYK I, LEWIK-TSIRIGOTIS M, CAPEK P, et al. Effects of extraction condition on structural features and anticoagulant activity of *F. vesca* L. conjugates[J]. *Carbohydrate polymers*, 2013, 92(1): 741–750.
- [64] BIJAK M, SALUK J, TSIRIGOTIS-MANIECKA M, et al. The influence of conjugates isolated from *Matricaria chamomilla* L. on platelets activity and cytotoxicity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 61: 218–229.
- [65] PAWLACZYK-GRAJA I. Polyphenolic-polysaccharide conjugates from flowers and fruits of single-seeded hawthorn (*Crataegus monogyna* Jacq.): Chemical profiles and mechanisms of anticoagulant activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116: 869–879.
- [66] 张露, 程鑫鹏, 邓梅, 等. 丹皮乙醇提取物的抗氧化和抗糖尿病活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2024, 36(5): 762–770. [ZHANG Lu, CHENG Xinpeng, DENG Mei, et al. Antidiabetic and antioxidant activities of ethanol extracts from moutan cortex[J]. *Natural Product Research and Development*, 2024, 36(5): 762–770.]
- [67] PAN X, ZHAO W, LIU Y. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of paeonol and loganin[J]. *Guid J Tradit Chin Med Pharm*, 2020, 26: 5.
- [68] GONG L X, FENG D N, WANG T X, et al. Inhibitors of α -amylase and α -glucosidase: Potential linkage for whole cereal foods on prevention of hyperglycemia[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(12): 6320–6337.
- [69] ZHU W L, ZHANG Z J. Preparation and characterization of catechin-grafted chitosan with antioxidant and antidiabetic potential[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 70: 150–155.
- [70] ZENG X G, DU Z J, DING X M, et al. Preparation, characterization and *in vitro* hypoglycemic activity of banana condensed tannin-inulin conjugate[J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 7973–7986.