

豆腐柴叶果胶分离纯化、表征、生物活性 及其应用研究进展

邱顺利^{1,2} 张舒婷^{1,2} 轩华龙^{1,2} 黄 凯^{1,2} 刘 爽^{1,2}
马 宽^{1,2} 唐华丽^{1,2}

(1. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆 404100; 2. 渝东北特色生物资源开发利用工程中心, 重庆 404100)

摘要:对豆腐柴叶果胶分离纯化方法进行了分类与归纳;总结了豆腐柴叶果胶的结构方法;简述了豆腐柴叶果胶的生物活性及应用。

关键词:豆腐柴叶果胶;分离纯化;结构表征;生物活性;应用

Research progress on the separation, purification, characterization, biological activity and application of pectin from *Premna microphylla Turcz* leaves

QIU Shunli^{1,2} ZHANG Shuting^{1,2} XUAN Hualong^{1,2} HUANG Kai^{1,2} LIU Shuang^{1,2}
MA Kuan^{1,2} TANG Huali^{1,2}

(1. College of Biology and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. Special Biological Resources Development and Utilization of Engineering Center of Ortheast Chongqing, Chongqing 404100, China)

Abstract: This review categorizes and summarizes the separation and purification approaches of pectin from *Premna microphylla Turcz*; Recapitulates the structural methods of pectin from *Premna microphylla Turcz*; Briefly delineates the biological activities and applications of pectin from *Premna microphylla Turcz*. The separation and purification methods of pectin from *Premna microphylla Turcz* leaves were classified and summarized, and the structural characterization methods of the pectin were also introduced in this review. Moreover, the biological activity and application of the pectin from *P. microphylla* were briefly described.

Keywords: *Premna microphylla Turcz*; pectin; separation and purification; structural characterization; biological activity

豆腐柴(*Premna microphylla Turcz*, PMT), 又称臭黄荆、狐臭柴^[1], 为马鞭草科多年生落叶灌木^[2], 具有解毒、消肿、止血等功效^[3], 是一种药食两用植物^[4]。豆腐柴中富含多种活性成分, 如果胶、蛋白质、黄酮、多酚等^[5]。果胶是豆腐柴的主要活性成分之一, 主要来源于豆腐柴叶^[6]。豆腐柴果胶由多种中性糖或糖醛酸通过糖苷键连接形成碳水化合物长链^[7], 其来源广泛, 种类繁多, 且结构复杂多样^[8], 具有抗炎、抗氧化、抑菌、降糖及免疫调节等活性^[9], 其毒性较低甚至无毒性^[10]。果胶的多糖结构会影响其生物活性^[11], 因此, 对豆腐柴果胶进行分离纯化和结构鉴定是研究其生物活性的前提和关键。

文章拟从分离纯化方法、结构表征、生物活性及应用 4 个方面阐述豆腐柴叶果胶的研究现状, 并对其未来发展趋势进行展望, 以期对豆腐柴叶果胶的研究及产业化利用提供依据。

1 豆腐柴叶果胶的分离纯化

1.1 提取

豆腐柴果胶主要提取方法有酸法、超声波辅助法、微波辅助法和酶法等^[12]。酸法是通过酸性溶液使细胞壁破裂释放出多糖^[13-14]。徐汶等^[15]采用盐酸和磷酸提取豆腐柴果胶, 确定最佳工艺条件为提取温度 90~95 °C、溶液 pH 值

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(编号:CSTB2022NSCQ-MSX1661)

通信作者:唐华丽(1982—), 男, 重庆三峡学院教授, 博士。E-mail: hualidfood@163.com

收稿日期:2023-09-01 **改回日期:**2024-08-12

1.5、提取时间 50~60 min,此条件下的提取率达 14%~17%。田媛等^[16]采用酸法提取豆腐柴果胶,在料液比 1:20 (g/mL)、浸提时间 120 min、温度 80 ℃的工艺条件下,果胶得率为 16.1%。

王鑫颀等^[17]采用超声波辅助法提取豆腐柴果胶,在超声时间 10 min,pH 5.0,料液比 1:15,酶用量 1.0 mL 的工艺条件下,果胶提取率达 29.07%。马俊^[18]采用微波辅助酸法提取豆腐柴果胶,确定了微波法的最佳工艺条件为微波炉功率 700 W、微波时间 5.5 min、pH 1、料液比 1:

15 (g/mL),此时果胶得率为 17.20%。张鹏等^[19]通过单因素试验确定酶法提取豆腐柴果胶工艺条件为温度 50 ℃,pH 5.5,加酶量 0.25 g,时间 60 min,料液比 1:20 (g/mL),提取率为 18.51%。

由表 1 可知,超声波辅助法提取豆腐柴果胶可以有效缩短萃取时间,提高果胶提取率。实际生产中,需结合提取率、生产成本、产品质量等多方面综合考虑,筛选出最佳提取工艺。

表 1 豆腐柴叶果胶不同提取方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different extraction methods of pectin from *P. microphylla* leaves

提取方法	优点	缺点	提取率/%	文献
酸提取法	操作简便、生产成本低、产物纯度高	提取时间长、易破坏果胶结构	20.61	[20]
超声波辅助法	提取率高、环保、易操作、快速、成本低	超声时间难控制	63.79	[21]
微波辅助法	时间短、能耗低	成本高、温度不易控制	19.41	[22]
酶提取法	节约能源、作用条件温和、专一性好	操作复杂、成本高	25.58	[23]

1.2 分离纯化

果胶提取液中一般含有较多的杂质,如色素、小分子物质等^[24],因此需提纯。去除豆腐柴粗果胶中杂质的重要步骤为脱色素,色素主要基于大孔树脂法、活性炭吸附法和过氧化氢法来去除。去除杂质后,还需对多糖进一步分离纯化,主要采用超滤法、沉淀法和柱层析法。

1.2.1 脱色素 洪亚男^[25]研究表明,AB-8 大孔树脂在脱色时间 180 min,树脂用量 6% 的条件下,对豆腐柴果胶脱色效果明显,脱色率和损失率分别为 73.67% 和 12%。徐汶等^[26]研究表明,D3520 树脂脱色效果显著,果胶损失量为 8% 左右,比活性炭低。石然然^[27]分别采用 X-5 型大孔树脂、AB-8 型大孔树脂、活性炭、30% 过氧化氢和硅藻土 5 种脱色剂对果胶提取液进行脱色效果比较,发现活性炭的脱色率和纯化后得率均相对较好,其最佳工艺参数为活性炭添加量 1.2 g/100 mL 果胶提取液,温度 40 ℃,时间 30 min,此条件下果胶脱色率为 56.83%,纯化后得率为 87.44%。罗文谦等^[28]选用活性炭对豆腐柴果胶进行脱色的效果明显。综上,大孔树脂和活性炭在豆腐柴果胶的脱色中表现出其特有的优越性。对豆腐柴果胶进行脱色时,不仅要考虑脱色效果,还要关注果胶多糖损失率,从而选择最合适的脱色方法。

1.2.2 超滤法 张俊峰等^[29]采用外压式聚砜膜管与聚醋酸纤维素膜管(截留相对分子质量均为 5×10^4),在温度 30~40 ℃,pH 值 < 3.5,流量 5~10 m³/h,压力 0.3~0.5 MPa 下分离豆腐柴果胶,果胶含量达 4%。赵若寒等^[30]采用截留相对分子质量 8 000~14 000 的滤膜纯化豆腐柴粗果胶,冷冻干燥得到果胶纯品组分,其总半乳糖醛酸含量较高,为 80.08%。吴韧^[31]采用截留相对分子质量 8 000~14 000 的

透析袋对豆腐柴果胶进行纯化,过滤小杂质分子,得到了大相对分子质量果胶纯品。该方法操作简单、纯度高,不易破坏物质的活性,但成本高、寿命短,不利于技术的发展。

1.2.3 沉淀法 包立军等^[32]将无水乙醇缓慢加至豆腐柴粗果胶溶液中,当乙醇体积分数分别为 30%,50% 时,得到不同组分的果胶多糖(30% 乙醇沉淀物、50% 乙醇沉淀物)。陈福明等^[33]在豆腐柴果胶纯化试验中,对比了铝盐沉淀和醇沉果胶,得出醇沉法纯化果胶产品色泽浅,质量较好。潘妍等^[34]用乙醇纯化豆腐柴果胶得到白色果胶粉末,其半乳糖醛酸含量较高。王红梅等^[35]采用乙醇纯化豆腐柴果胶,得到的果胶纯度和色度均有所改善,用此法制取的果胶颜色浅,品质高。

1.2.4 柱层析法 吴韧等^[36]将已脱蛋白的豆腐柴果胶多糖溶液过 DEAE-52 纤维素柱,经去离子水洗脱后分别得到两种组分多糖。张娜^[37]用 DEAE-52 纤维素柱层析纯化豆腐柴果胶,用纯水反复洗涤以除去杂质,得到 3 个组分,该方法易操作、设备简单,但不适用于分离黏多糖且无法实现大规模分离纯化多糖。

2 豆腐柴叶果胶结构表征

2.1 单糖组成

杨丹丹等^[38]测得豆腐柴果胶中含有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖和岩藻糖 8 种单糖组成,各单糖的摩尔百分含量分别为 0.22%, 6.13%, 4.58%, 31.98%, 18.31%, 9.9%, 10.23%, 4.09%。宁海凤^[39]采用色谱法测得豆腐柴果胶由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖组成,其摩尔比为 17:26:13:4:149:54。蒋立科等^[40]通过硫酸提取豆腐

柴果胶,乙醇沉淀纯化得到纯品果胶,其中果胶多糖主要由葡萄糖、果糖、*D*-甘露糖组成。廖雯娟等^[41]采用薄层层析图谱测得豆腐柴果胶中含有葡萄糖、果糖和半乳糖。综上,豆腐柴果胶的单糖组成中阿拉伯糖、鼠李糖、甘露糖、果糖、葡萄糖以及半乳糖较为统一。

2.2 平均相对分子质量

潘妍等^[42]通过 HPGPC 测定了豆腐柴粗果胶中含有 4 种不同相对分子质量的果胶,平均相对分子质量分别为 1.966×10^5 , 3.992×10^4 , 3.797×10^4 , 2.965×10^4 。陈军^[43]采用不同方法提取豆腐柴果胶,分别得到水溶性、酸溶性和碱溶性果胶,水溶性果胶含有两个峰,其平均相对分子质量分别为 9.5887×10^5 , 2.0630×10^4 ;酸溶性果胶只有单个峰,约为 2.0808×10^5 ;碱溶性果胶有 2 个峰,其相对分子质量分别为 3.8799×10^5 , 1.0180×10^4 。综上,不同方法提取所得豆腐柴果胶相对分子质量分布不同。

2.3 化学结构

豆腐柴果胶的成分和结构受采摘月份、提取方法等影响,但通过红外测定和扫描电镜分析,不同方法提取的豆腐柴果胶中均含有果胶多糖所特有的主要特征峰,反映出官能团一致,具有相似的化学结构,空间结构略有不同,电镜下除蒸汽条件下提取的豆腐柴果胶表面较光滑外,其余方法提取果胶表面均较粗糙^[44]。超声处理后豆腐柴果胶酯化度降低,糖苷键断裂,但糖环、构型和连接方式未改变^[45]。李晓等^[46]通过扫描电镜观察到酸法提取的豆腐柴粗果胶呈多褶皱的聚集团状,持水力和持油力较强。杨宁线^[47]通过 X 衍射证实豆腐柴果胶具有晶体结构。目前,有关豆腐柴果胶结构表征的研究较少,仍处于探索阶段,如果胶自身相对分子质量较大,紫外吸收困难,这在一定程度上限制了豆腐柴果胶的开发与利用。

3 豆腐柴果胶的生物活性

豆腐柴果胶具有多种生物活性,被广泛应用于功能性食品、药品等。豆腐柴果胶的生物活性及作用机制如图 1 所示。

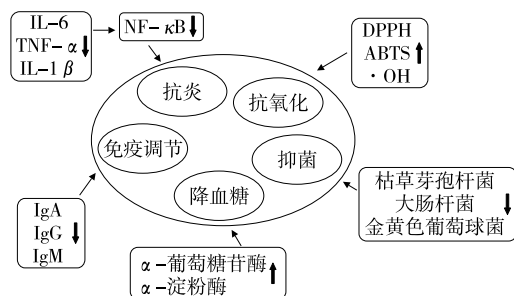


图 1 豆腐柴果胶的生物活性及作用机制

Figure 1 Bioactivity and mechanism of *P. microphylla* pectin

3.1 抗炎性

Liu 等^[48]以角叉菜胶溶液皮下注射 ICR 小鼠右后爪构建肿胀炎症模型,将豆腐柴果胶作用于炎症小鼠,结果显示,豆腐柴果胶可显著改善模型小鼠足跖肿胀,并降低血清 IL-6、TNF- α 和 IL-1 β 水平,有效抑制炎症发展,且对小鼠无毒性作用。Li 等^[49]研究发现,豆腐柴果胶有显著的自由基清除能力,通过增强 SOD、GPx、CAT 活性,有效抑制了 LPS 刺激的 RAW 264.7 巨噬细胞中的活性氧和丙二醛的产生,从而减轻了炎症的发生。Song 等^[50]将豆腐柴果胶作用于十二烷基硫酸钠(SDS)引起的炎症苍蝇中,发现豆腐柴果胶通过保护胃肠道微结构、调节各种免疫基因的表达和肠道植物群,促进炎症果蝇的肠道防御。豆腐柴果胶使 SDS 致炎果蝇肠道菌群特征趋于正常,从而减轻果蝇炎症反应。综上,豆腐柴果胶可通过调节 RAW264.7 细胞,下调 TNF- α 、IL-6 和 IL-1 β 促炎因子表达来减轻炎症反应。同时,豆腐柴果胶多糖还可调节肠道菌群结构,通过提高肠道益生菌的多样性及丰度,发挥抗炎作用。

3.2 抗氧化活性

石仕慧等^[51]研究发现,豆腐柴粗果胶具有清除 DPPH 自由基的能力,采用超声波辅助提取的果胶多糖提取率高且其抗氧化活性最强。Lu 等^[52]研究表明,随着豆腐柴果胶质量浓度的增加,DPPH 自由基清除活性逐渐增加,当豆腐柴果胶质量浓度为 1 mg/mL 时,清除率为 90%。刘昕等^[53]研究表明,当果胶质量浓度为 2.00 g/L 时,豆腐柴果胶的 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率分别达到 87.01%, 96.08%。黄海东等^[54]研究表明,当果胶质量浓度为 2.0 mg/mL 时,豆腐柴果胶清除 DPPH 自由基和羟自由基效果较好,自由基清除率分别为 61.0% 和 53.2%。陶阿丽等^[55]证实豆腐柴果胶对羟自由基具有清除能力,且清除率与其质量浓度存在量效关系。综上,豆腐柴果胶具有抗氧化活性,且不同提取方法所获得的豆腐柴果胶抗氧化性效果不同,需进一步研究。

3.3 抑菌作用

刘莎等^[56]研究表明,豆腐柴果胶具有抑菌性,且复合酶提取的果胶对枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果最好。当 pH 值为 7 时,豆腐柴果胶对乳酸链球菌素(Nisin)具有一定保护作用。Nisin 对许多革兰氏阳性菌具有抑制作用^[57]。将果胶与其配合,可增强抗菌效果^[58]。

3.4 降血糖

李扬^[59]研究发现,微波辅助提取的豆腐柴果胶对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制活性较强,对 α -淀粉酶活性的抑制作用存在量效关系。刘焕举等^[60]通过对豆腐柴果冻的降血糖活性进行研究,发现其果冻中果胶含量为 (155.71 ± 10.86) mg,有较好的降糖作用。但豆腐柴果胶在哺乳动

物体内的降血糖活性与果胶的结构关系尚未充分阐明,有待进一步研究。

3.5 免疫调节

向东^[61]通过对豆腐柴果胶和硒蛋白制作的微凝胶进行研究,发现其显著降低了血清免疫球蛋白 IgA、IgG 和 IgM 含量。与植物硒蛋白相比,果胶微凝胶低浓度组比植物硒蛋白高浓度组的 IgA、IgM 含量更低,说明果胶微凝胶的免疫调节效果比植物硒蛋白更好,表明豆腐柴果胶微凝胶和植物硒蛋白均有增强体液免疫的功能,其中果胶微凝胶的效果更显著。综上,豆腐柴果胶具有免疫调节的作用,但目前有关研究较少,关于豆腐柴果胶免疫调节的构效关系尚不明确,同时作为大分子多糖,其在体内如何实现免疫调节活性的作用机制仍未探明。

4 豆腐柴叶果胶的应用

4.1 在食品工业中的应用

张攀^[62]在凝固型发酵乳中添加了 0.05% 的豆腐柴叶果胶,所得产品质量与添加 0.15% 橘皮果胶的相近,表明豆腐柴果胶对发酵乳的稳定性有显著影响,且比普通市售橘皮果胶更好。王媛莉^[63]以纯化后的豆腐柴果胶作为增稠剂制作酸奶,从黏度、持水力等角度,对豆腐柴果胶与其他增稠剂的性能进行了全面评价。结果表明,在酸奶中添加 0.3% 的果胶及羧甲基纤维素钠后,产品黏度最高,保水能力最强,比其他增稠剂的效果好。Fei 等^[64]在绿豆淀粉中加入豆腐柴果胶制作复合凝胶,证实豆腐柴果胶可提高复合凝胶热稳定性。赵宏伟^[65]采用豆腐柴果胶制作豆腐,可提高产品的稳定性,且具有良好的硬度和韧性。陈晔等^[66]证实豆腐柴叶果胶可形成稳定的凝胶,且有较好的耐热性,其黏度满足“布丁型”增稠吞咽障碍食物的技术指标,对改善老年人及特殊病症者的身体素质及生活品质有重要作用。汪选斌^[67]以豆腐柴果胶为原料制备快速凝固剂,与碳酸钙相比缩短了凝固时间且降低了渗水率,改善了产品口感。白晓琼等^[68]采用豆腐柴果胶制作果酱,所得产品色香俱全。

4.2 在生态领域中的应用

果胶对金属离子具有较强的亲和力,被认为是具有前途的生物吸附剂,豆腐柴叶植物果胶是一种可生物降解的生物质吸附材料,可吸附环境中的重金属^[69]。Gong 等^[70]采用豆腐柴制备微球吸附剂,发现原料中所含的果胶和金属离子有利于形成微球和吸附铀,制备的最佳微球的最大吸附量为 346.65 mg/g,有望以更具成本效益和环保的方式处理含铀废水。姚元勇等^[71]以豆腐柴叶为原料制备果胶吸附材料,并测试其吸附性。结果表明,豆腐柴果胶可高效、稳定吸附铜离子,说明豆腐柴果胶是一种新型生物质果胶吸附材料。

4.3 在医疗美容中的应用

明建等^[72]制得的豆腐柴果胶面膜液对皮肤晒后出现的泛红、瘙痒、脱皮等症状有很好的治疗作用,且易制备,温和不刺激,在美容领域中有很好的推广应用价值。Chen 等^[73]制得的含有豆腐柴果胶的乳膏可有效抑制紫外照射诱导的皮肤损伤小鼠的水分损失、表皮增生和胶原破坏,局部施用乳膏可增强核因子-1 相关因子 2(Nrf2),以及 SOD、CAT 和 GPx,在小鼠皮肤上涂抹乳膏可降低核因子- κ B (NF- κ B) 的蛋白水平,这些结果均提示豆腐柴果胶可通过抑制 NF- κ B 通路来保护紫外照射诱导的皮肤衰老。Chi 等^[74]将含果胶的豆腐柴提取液制成中药微针贴剂用于创面愈合。综上,豆腐柴果胶具有修护肌肤屏障的作用,是凝胶敷料、精华液、乳液等医疗美容用品的优良添加剂。

4.4 在化工领域中的应用

Su 等^[75]采用酸性低共熔溶剂(氯化胆碱/柠檬酸,DES)高效提取豆腐柴中的食用果胶(PMTP)并制备膜传感器。结果表明,该膜具有良好的相容性,其表面光滑、透气性好,并具有较好的电导率稳定性和较高的灵敏度。此外,该复合膜还具有较好的抗菌活性。周芳芳^[76]采用豆腐柴果胶和大豆分离蛋白制备了复合膜,结果表明,复合膜具有较好的机械特性和膜结构,且具有抗氧化和抗菌活性。Zeng 等^[77]将豆腐柴果胶加入 ZnO 中制作纳米薄膜并测定其活性。结果表明,该薄膜对金黄色葡萄球菌有明显的抑制作用。豆腐柴果胶有直接、快速和有效的胶凝方式以及其特殊的性质^[78],包括理想的生物相容性、生物降解性、黏液黏附性、天然丰度和可重复性,有望为天然果胶和低共熔溶剂在化工材料领域的多功能和巨大潜力的创新应用提供新的策略。

5 结论与展望

豆腐柴叶果胶的毒副作用小、组成复杂、结构独特,具有多种生物活性,在食品、化妆品和医疗领域具有广阔的应用前景。近年来,有关豆腐柴果胶的提取、分离纯化和生物活性的研究逐渐增多,但也存在一些亟待解决的问题:① 如何将提取过程中已用过的有机试剂进行回收利用是一个值得关注的问题。② 豆腐柴果胶分离纯化的方法不够完善,尚未标准化。③ 有关豆腐柴果胶的组成和结构特点的研究较少,有待深入探索。④ 豆腐柴果胶的生物活性研究主要集中在抗炎、抗氧化、抑菌、降糖等方面,对其他的生物活性研究还鲜有报道,且大多处于试验阶段,需进一步研究其长期安全性。因此,后续需对豆腐柴果胶分离和纯化的条件、工艺进行优化并研究开发出新型、高效的分离和纯化技术。同时,通过对豆腐柴叶果胶成分、化学结构的分析,揭示其结构与生物活性的内在联系,为其在各领域的应用奠定基础。

参考文献

- [1] 王艳秋, 阳娇, 张琦, 等. 狐臭柴叶发酵面包制作工艺优化与理化指标分析[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(12): 53-61.
WANG Y Q, YANG J, ZHANG Q, et al. Production process optimization and physicochemical analysis of fermented bread made from *Premna puberula* leaves[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(12): 53-61.
- [2] DUAN H, WANG W, LI H X, et al. Identification of phytochemicals and antioxidant activity of *Premna microphylla* Turcz stem through UPLC-LTQ-Orbitrap-MS[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131482.
- [3] PU D B, DU B W, CHEN W, et al. *Premna fulvol* A: a diterpenoid with a 6/5/7/3-fused tetracyclic core and its biosynthetically related analogues from *Premna fulva*[J]. Organic Letters, 2018, 20(19): 6 314-6 317.
- [4] GAO J, ZHANG M, ZHANG L, et al. Dietary pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves prevents obesity by regulating gut microbiota and lipid metabolism in mice fed high-fat diet[J]. Foods, 2024, 13(14): 2 248.
- [5] HU Z, W Y Y. Chemical constituents from the leaves of *Premna microphylla* Turcz[J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences, 2013, 22(5): 431-434.
- [6] WANG K W, YAN S N, ZHANG T T, et al. A novel cytotoxic flavonoid C-glycoside from *Premna fulva*[J]. Natural Product Research, 2019, 35(6): 1-6.
- [7] ELSYANA V, ALVITA L R. Characterization of pectin from cincau (*Premna oblongifolia* Merr.) leaves[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1 012: 012050.
- [8] TANG G Q, LIN X J, LI J N, et al. Pharmacognostical studies of *Premna microphylla*[J]. Revista Brasileira Farmacognosia, 2018, 28(5): 520-526.
- [9] YE R C, LI H S, LONG J Y, et al. Bio-aerogels derived from corn stalk and *Premna microphylla* leaves as eco-friendly sorbents for oily water treatment: the role of microstructure in adsorption performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 403: 136720.
- [10] SUCHETA K, MILAD K, SARA S A, et al. Structural-functional variability in pectin and effect of innovative extraction methods: an integrated analysis for tailored applications[J]. Food Reviews International, 2023, 39(4): 2 352-2 377.
- [11] 李盼, 曾祥权, 李倩倩, 等. 块菌多糖的提取、结构、功能及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 213-220.
LI P, ZENG X Q, LI Q Q, et al. Research progress on extraction, structural, functional properties and applications of Tuber polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 213-220.
- [12] SHI Q, ZOU M Y, SONG M M, et al. Effects of ultrasonic on structure, chain conformation and morphology of pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 296: 119949.
- [13] PANCERZ M, PTASZEK A, SOFINSKA K, et al. Colligative and hydrodynamic properties of aqueous solutions of pectin from cornelian cherry and commercial apple pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 89: 406-415.
- [14] 费丛璇, 付美玲, 张迪, 等. 果胶的提取、生理功能及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 233-240.
FEI C X, FU M L, ZHANG D, et al. Research progress on extraction, physiological function and application of pectin[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 233-240.
- [15] 徐汶, 张俊峰, 王存文, 等. 豆腐柴叶果胶的提取工艺条件研究[J]. 天然产物研究与开发, 2003(2): 138-140.
XU W, ZHANG J F, WANG C W, et al. Study on technological conditions of extracting pectin from *Premna microphylla*[J]. Research and Development of Natural Product, 2003(2): 138-140.
- [16] 田媛, 陈月圆, 赵武奇, 等. 豆腐柴叶果胶提取工艺优化[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 203-211.
TIAN Y, CHEN Y Y, ZHAO W Q, et al. Optimization of the extraction process of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaf[J]. Journal of Hainan Normal University(Natural Science), 2024, 37(2): 203-211.
- [17] 王鑫顺, 潘信君, 左玉玲. 超声波辅助酶法提取豆腐柴中果胶方法的研究[J]. 现代食品, 2019(8): 107-110.
WANG X Q, PAN X J, ZUO Y L. A study on ultrasonic assisted extraction of pectin from *Premna microphylla* with pectinase[J]. Modern Food, 2019(8): 107-110.
- [18] 马俊. 从豆腐柴中提取低酯果胶的工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 27-43.
MA J. Study on extraction low-methoxy pectin from *Premna microphylla* Turcz[D]. Chongqing: Southwest University, 2007: 27-43.
- [19] 张鹏, 沈炼成, 茹神来, 等. 纤维素酶法提取豆腐柴叶果胶的初探[J]. 广州化工, 2011, 39(13): 63-64, 145.
ZHANG P, SHEN L C, RU S L, et al. Preliminary investigation of cellulase on extracting *Premna* pectin[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(13): 63-64, 145.
- [20] CHEN J, LIANG R H, LIU W, et al. Extraction of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves and its physicochemical properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102(1): 376-384.
- [21] 王媛莉, 李梅青, 董明, 等. 草酸铵超声辅助提取豆腐柴果胶[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 88-91.
WANG Y L, LI M Q, DONG M, et al. Ultrasonic-aided ammonium oxalate extraction of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves[J]. Food Science, 2011, 32(10): 88-91.
- [22] 宁海凤, 童群义. 超声微波协同萃取豆腐柴叶中果胶的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(3): 148-151.
NING H F, TONG Q Y. Ultrasonic-microwave synergistic extraction of pectin from leaves of *Premna microphylla* Turcz[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(3): 148-151.
- [23] 刘昕. 豆腐柴果胶制备及其防护 UVB 诱导的皮肤损伤作用

- 研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 24-30.
- LIU X. Preparation and protective effect of pectin from *Premna microphylla Turcz* on UVB-Induced skin damage[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 24-30.
- [24] 贾国军, 王小英, 负建民, 等. 蝉花多糖的提取和生物活性及产品研发进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 217-223, 240.
- JIA G J, WANG X Y, YUN J M, et al. Research progress on extraction, biological activities and product development of polysaccharides from cicada flower[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 217-223, 240.
- [25] 洪亚男. 豆腐柴叶果胶的提取及其理化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018: 23-25.
- HONG Y N. Extraction and characterization of pectin from *Premna microphylla Turcz* leaves[D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial Business University, 2018: 23-25.
- [26] 徐汶, 王为国, 张俊峰, 等. 树脂吸附法豆腐柴叶果胶提取液脱色的研究 (I) D3520 树脂对色素的吸附性能[J]. 离子交换与吸附, 2005(4): 323-328.
- XU W, WANG W G, ZHANG J F, et al. Study on the decolorization of *Premna microphylla* pectin extract by resin adsorption method (I) the adsorption performance of D3520 resin on pigment[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2005(4): 323-328.
- [27] 石然然. 豆腐柴果胶的提取纯化及其在凝固型酸奶中的应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 22-26.
- SHI R R. Extraction and purification of *Premna microphylla Turcz* pectin and its application in solidified yogurt[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021: 22-26.
- [28] 罗文谦, 王建安. 从豆腐柴中提取果胶的研究[J]. 安康师专学报, 2003(4): 67-68.
- LUO W Q, WANG J A. The technology of extracting the pectin from the plan: Japanese *Premna*[J]. Journal of Ankang Teachers College, 2003(4): 67-68.
- [29] 张俊峰, 徐汶, 王存文. 从豆腐柴叶中提取果胶的工艺研究[J]. 湖北化工, 2002(3): 37-38.
- ZHANG J F, XU W, WANG C W. Extraction of pectin from *Premna microphylla*[J]. Hubei Chemical Industry, 2002(3): 37-38.
- [30] 赵若寒, 刘佳奇, 张艺, 等. 豆腐柴果胶凝胶特性及其凝胶食品应用[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(9): 2 013-2 019.
- ZHAO R H, LIU J Q, ZHANG Y, et al. Characteristics of pectin gel from *Premna microhylla Turcz* and its application of gel food[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(9): 2 013-2 019.
- [31] 吴韧. 豆腐柴果胶多糖的理化及加工性能[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024: 9-13.
- WU R. Physicochemical properties and processing properties of pectin from *Premna microhylla Turcz*[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024: 9-13.
- [32] 包立军, 柯斧, 孙凯, 等. 优化超声波辅助提取豆腐木叶果胶的工艺及产品性质分析[J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 201-207.
- BAO L J, KE F, SUN K, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of pectin from *Premna microphylla* leaves and analysis of product properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(10): 201-207.
- [33] 陈福明, 柴文森, 陈顺伟, 等. 豆腐柴叶提取果胶工艺研究[J]. 浙江林业科技, 1988(2): 1-6.
- CHEN F M, CHAI W M, CHEN S W, et al. Study on the technology for extracting pectin from *Premna microphylla*[J]. Zhejiang Forestry Science and Technology, 1988(2): 1-6.
- [34] 潘妍, 贾红亮, 林少华, 等. 响应面法提取臭黄荆叶果胶的研究[J]. 农业技术与装备, 2022(5): 11-13.
- PAN Y, JIA H L, LIN S H, et al. Study on optimization of extraction conditions from *Premna hainanensis* by response surface methodology[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2022(5): 11-13.
- [35] 王红梅, 陶芳, 魏练平, 等. 豆腐柴果胶的纯化及其理化性质研究[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(6): 60-62.
- WANG H M, TAN F, WEI L P, et al. Purification and physicochemical properties of pectin from *Premna microphylla* [J]. Wild Plant Resources in China, 2009, 28(6): 60-62.
- [36] 吴韧, 刘爽, 马宽, 等. 豆腐柴果胶多糖理化指标及乳化性质[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 174-181.
- WU R, LIU S, MA K, et al. Physicochemical indexes and emulsification properties of pectin polysaccharide from *Premna microphylla Turcz*[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(9): 174-181.
- [37] 张娜. 豆腐柴果胶的理化性质及单糖组成研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 12-20.
- ZHANG N. Physicochemical properties and monosaccharide composition of pectin extracted from *Premna microphylla Turcz*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022: 12-20.
- [38] 杨丹丹, 朱玉昌, 周大寨. 利用响应面法优化狐臭柴叶多糖提取工艺、单糖组成及生物活性研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(6): 493-502.
- YANG D D, ZHU Y C, ZHOU D Z. Optimization of extraction process, monosaccharide composition, and biological activity of polysaccharides from *Premna puberula pamp* on response surface methodology[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences Edition), 2023, 38(6): 493-502.
- [39] 宁海凤. 豆腐柴叶中果胶的提取工艺及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010: 12-29.
- NING H F. Study on extraction technology and properties of pectin from leaves of *Premna microphylla Turcz*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 12-29.
- [40] 蒋立科, 陈祎凡, 金青, 等. 豆腐柴叶果胶理化性质及“神仙豆腐”制备的条件[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 138-142.
- JIANG L K, CHEN Y W, JIN Q, et al. Physical and chemical properties of pectin from *Premna microphylla* leaves and its effect on the coagulation of fairy tofu[J]. Food Science, 2012, 33(23): 138-142.

- [41] 廖雯娟, 蒋立科, 魏练平. 豆腐柴叶提取低酯果胶的研究[J]. 中国野生植物资源, 2010, 29(5): 39-43.
- LIAO W J, JIANG L K, WEI L P. Low-ester pectin extraction from *Premna* leaves[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2010, 29(5): 39-43.
- [42] 潘妍, 贾红亮, 林少华, 等. 臭黄荆叶果胶分子量和单糖研究[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(6): 11-13.
- PAN Y, JIA H L, LIN S H, et al. Study on optimization of extraction conditions from *Premna hainanensis* by response surface methodology[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2022, 25(5): 11-13.
- [43] 陈军. 特色资源果胶的提取和物理化学性质表征及微射流降解机理[D]. 南昌: 南昌大学, 2013: 87-99.
- CHEN J. Extraction and physicochemical characterization of pectins from some special resources and the mechanism of pectin degradation induced by dynamic high pressure microfluidization[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013: 87-99.
- [44] 胡予, 张攀, 陈信, 等. 不同月份豆腐柴叶果胶理化性质差异研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 38-43, 49.
- HU Y, ZHANG P, CHEN X, et al. Extraction and physicochemical properties of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 38-43, 49.
- [45] SHI Q, ZOU M Y, WANG J H, et al. Ultrasonic effects on molecular weight degradation, physicochemical and rheological properties of pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz[J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 221: 1 065-1 076.
- [46] 李晓, 李静雯, 陈晔, 等. 豆腐柴叶低甲氧基果胶提取工艺优化及其加工特性和微观结构研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 14-21.
- LI X, LI J W, CHEN Y, et al. Optimization of low-methoxy pectin extraction from *Premna microphylla* Turcz and study on its processing characteristics and microstructure properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 14-21.
- [47] 杨宁线. 狐臭柴叶片果胶高效积累的机制[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022: 52-53.
- YANG N X. Mechanism of efficient accumulation of pectin in *Premna puberula* Pamp. leaves[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022: 52-53.
- [48] LIU K Q, GUO Y Y, CHEN X J, et al. Quality control, preparation process optimizing and anti-inflammatory effects of *Premna puberula* Pamp. pectin[J]. Heliyon, 2022, 8(10): e11082.
- [49] LI X, WEI Z L, WANG X Y, et al. *Premna microphylla* Turcz leaf pectin exhibited antioxidant and anti-inflammatory activities in LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129-164.
- [50] SONG G L, CHEN F F, CHEN S B, et al. Polysaccharides from *Premna microphylla* Turcz ameliorate inflammation via the enhancement of intestinal resistance in host[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 276: 114-208.
- [51] 石仕慧, 冀晓龙, 李秀中, 等. 三种方法提取豆腐柴叶果胶抗氧化性比较研究[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 65-68.
- SHI S H, JI X L, LI X Z, et al. Comparison of antioxidant activity of pectin extracted from *Premna microphylla* leaves by three methods[J]. Food Industry, 2017, 38(1): 65-68.
- [52] LU J K, LI J J, JIN R C, et al. Extraction and characterization of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 131: 323-328.
- [53] 刘昕, 张驰, 薛艾莲, 等. 超声—酶法提取的豆腐柴低酯果胶理化性质及结构表征[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 108-115.
- LIU X, ZHANG C, XUE A L, et al. Physicochemical properties and structure characterization of low-methoxy pectin from *Premna microphylla* Turcz extracted by ultrasound-enzyme treatment[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(8): 108-115.
- [54] 黄海东, 杨宁线, 吴洪丽, 等. 狐臭柴叶果胶的酸法提取工艺优化及其理化性质、抗氧化性和结构研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 309-317.
- HUANG H D, YANG N X, WU H L, et al. Optimization of acid extraction process and study on physicochemical properties, antioxidant properties, and structure of pectin from *Premna puberula* Pamp. leaves[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 309-317.
- [55] 陶阿丽, 冯学花, 尹伟, 等. 响应面法优化微波辅助提取豆腐柴果胶工艺及其抗氧化研究[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2014, 29(4): 53-60.
- TAO A L, FENG X H, YIN W, et al. Optimization of microwave -assisted extraction of pectin from *Premna microphylla* by response surface method and its antioxidant activity[J]. Journal of Shantou University (Natural Science Edition), 2014, 29(4): 53-60.
- [56] 刘莎, 邓利玲, 钟耕, 等. 酶解法制备臭黄荆叶果胶的结构、理化性质、抗氧化和抗菌活性[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 55-63.
- LIU S, DENG L L, ZHONG G, et al. Structure, physicochemical properties, antioxidant and antimicrobial activities of pectin prepared by enzymatic hydrolysis of *Premna ligustroides* hemsl leaves[J]. Food Science, 2023, 44(23): 55-63.
- [57] 晋睿冲. 豆腐柴叶中果胶提取、理化性质表征及生物活性初步研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018: 46-48.
- JIN R C. Extraction, physicochemical properties, characterization and biological activity of pectin from *Premna microphylla* Turcz leaves[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018: 46-48.
- [58] 姚文俊, 杨勇, 刘希, 等. 微生物源乳酸链球菌素(Nisin)及在食品中应用研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 215-220.
- YAO W J, YANG Y, LIU X, et al. Research progress of nisin

- from microorganism and its application in food[J]. Chinese Condiments, 2023, 48(1): 215-220.
- [59] 李扬. 狐臭柴叶片果胶提取及干燥技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021: 37-40.
- LI Y. Study on extraction and drying technology of pectin from *Premna puberula* pamp[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 37-40.
- [60] 刘焕举, 高月滢, 刘飞, 等. 豆腐柴果冻的制作工艺优化及其降血糖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2 463-2 469.
- LIU H J, GAO Y Y, LIU F, et al. Study of processing technology optimization and hypoglycemic activity of jelly from *Premna microphylla Turcz*[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2018, 9(10): 2 463-2 469.
- [61] 向东. 狐臭柴果胶负载植物硒蛋白微凝胶生物活性研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023: 43-45.
- XIANG D. Bioactivity study of plant selenium protein rich microgel loaded with *Premna puberula* pectin[D]. Enshi: Hubei Minzu University, 2023: 43-45.
- [62] 张攀. 豆腐柴叶果胶的分离及特性研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019: 64-66.
- ZHANG P. Separation and characteristics of pectin from *Premna microphylla Turcz* leaves[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019: 64-66.
- [63] 王媛莉. 豆腐柴果胶的提取及其特性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013: 38-39.
- WANG Y L. Study on the extraction and properties of pectin in *Premna microphylla Turcz*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011: 38-39.
- [64] FEI W, RONG L, QI X, et al. Effects of *Premna microphylla Turcz* polysaccharide on rheological, gelling, and structural properties of mung bean starch and their interactions[J]. Food Research International (Ottawa, Ont.), 2024, 189: 114561.
- [65] 赵宏伟. 本盛果胶冻[Z]. 安徽省, 合肥本盛生物科技有限公司, 2016-10-13.
- ZHAO H W. Bensheng pectin[Z]. Anhui Province, Hefei Bensheng Biotechnology Co Ltd, 2016-10-13.
- [66] 陈晔, 李静雯, 李晓, 等. 豆腐柴叶果胶凝胶流变特性及其在咽喉障碍食品中的应用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 252-258.
- CHEN Y, LI J W, LI X, et al. Rheological properties of *Premna microphylla Turcz* pectin and its application in food for improving dysphagia[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(11): 252-258.
- [67] 汪选斌. 长柄臭黄荆果胶速效凝固剂的研制及果胶制备工艺: CN202110325012.1[P]. 2021-06-29.
- WANG X B. Preparation of quick acting coagulant and pectin preparation technology of Longshank odor wattle pectin: CN202110325012.1[P]. 2021-06-29.
- [68] 白晓琼, 何沛, 罗红林, 等. 江西豆腐柴的开发与利用[J]. 江西林业科技, 1989(3): 1-4.
- BAI X Q, HE P, LUO H L, et al. Development and utilization of tofu Chai in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 1989(3): 1-4.
- [69] TONK S, NAGY B, TRK A, et al. Cd(II), Zn(II) and Cu(II) Bioadsorption on chemically treated wastebrewery yeast biomass: the role of functional groups[J]. Acta Chim Slov, 2015, 62(3): 736-746.
- [70] GONG H Y, LI X Y, XIE Y, et al. A novel self-crosslinked gel microspheres of *Premna microphylla turcz* leaves for the absorption of uranium[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404: 124-151.
- [71] 姚元勇, 何来斌, 张萌, 等. 新型生物质果胶吸附材料的制备及水溶液中铜离子(II)吸附性能研究[J]. 化学试剂, 2022, 44(3): 393-400.
- YAO Y Y, HE L B, ZHANG M, et al. Preparation of novel biomass pectin adsorbing material and its adsorption performance for copper (II) ion in aqueous solution[J]. Chemical Reagents, 2022, 44(3): 393-400.
- [72] 明建, 刘昕, 赵吉春. 一种豆腐柴果胶面膜液及其制备方法: CN112754955A[P]. 2021-05-07.
- MING J, LIU X, ZHAN J C. A *Premna microphylla Turcz* pectin mask solution and its preparation method: CN112754955A[P]. 2021-05-07.
- [73] CHEN Y Y, LIU X, LEI X J, et al. *Premna microphylla Turcz* pectin protected UVB-induced skin aging in BALB/c-nu mice via Nrf2 pathway[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 215: 12-22.
- [74] CHI J J, SUN L Y, CAI L J, et al. Chinese herb microneedle patch for wound healing[J]. Bioactive Materials, 2021, 6(10): 3 507-3 514.
- [75] SU Y, DCHEN Y, QIN Y T, et al. Pectin extracted from *Premna microphylla Turcz* for preparation of a "sandwich" multi-property sensor film involved with deep eutectic solvent [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127171.
- [76] 周芳芳. 豆腐柴果胶与大豆分离蛋白冷凝胶的研究及可食膜的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 48-51.
- ZHOU F F. Study on the cold gelation between pectin of *Premna microphylla Turcz* with soy protein isolate and the preparation of edible films[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 48-51.
- [77] ZENG D, DU Z Q, WU X Y, et al. Fabrication and characterization of ZnO nanofilms using extracted pectin of *Premna microphylla Turcz* leaves and carboxymethyl cellulose [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 525-532.
- [78] HANG Z H, XING G L, TU C H, et al. Effect of *Premna microphylla Turcz* leaves' extract addition on physicochemical and antioxidant properties of packed tofu by lactic fermentation [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6): 2 541-2 550.