



郭向阳,王璐璐,马景可,等. 超声波降解多糖的作用表现、影响因素及机理研究进展[J]. 轻工学报,2025, 40(4):41-51.
GUO X Y, WANG L L, MA J K, et al. Research progress on ultrasonic degradation of polysaccharides: Effects, influencing factors, and mechanisms[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(4):41-51.
DOI: 10.12187/2025.04.005

超声波降解多糖的作用表现、影响因素及机理研究进展

郭向阳^{1,2,3}, 王璐璐⁴, 马景可¹, 金珂婷¹

1. 信阳师范大学 茶学与食品学院, 河南 信阳 464000;
2. 大别山实验室, 河南 信阳 464000;
3. 深圳大学 化学与环境工程学院, 广东 深圳 518060;
4. 山西农业大学 园艺学院, 山西 太谷 030801

摘要: 多糖的生物活性与其相对分子质量密切相关,而具有简单、快速、环保、高效等优点的超声波法在降解多糖并增强其生物活性方面日益受到研究者的重视。对近年来超声波降解多糖的作用表现、影响因素及机理研究进行综述,认为:超声波降解可有效改变多糖的物化性质,降低其相对分子质量、溶液黏度及分子空间尺寸,提升其溶解度;还可引发单糖组成、单糖结构,以及分子空间构型、结晶状态等多糖结构的变化,增强多糖的抗氧化、免疫调节、降血糖等生物活性。超声波降解多糖的机理涵盖机械断键、空穴效应及自由基氧化还原反应,且受多糖相对分子质量、温度、超声功率、超声频率等多种因素的综合影响。实际应用中应结合多糖种类与需求优化参数,以调控降解过程。目前,超声波降解多糖的研究种类较单一,未来研究将集中在超声波降解多糖的构效关系与机理解析、同源类多糖降解条件与极限值探索、糖苷键定向裂解技术优化、多糖结构与生物活性关联性分析、降解条件系统拓展、动力学模型精准构建及工业化应用等方面,以促进超声波法在多糖降解中的应用,实现对多糖降解过程的精准调控。

关键词: 多糖;超声波降解;物化性质;生物活性;影响因素;降解机理

中图分类号: TS201.2;O426.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)04-0041-11

0 引言

多糖(Polysaccharide)又称多聚糖,是由10个以上单糖通过糖苷键聚合而成的天然高分子化合物,主要存在于高等植物、藻类、细菌类、真菌类及动物体内,具有抗肿瘤^[1]、抗病毒^[2]、免疫调节^[3]、调控并降低血脂水平^[4]、保肝健胃^[5-6]、延缓衰老^[7]等生

物活性,已被广泛应用于保健品、食品、药品等领域。多糖的生物活性与其相对分子质量密切相关,只有当其相对分子质量处于一定范围内时,才能形成有效的高级构型,进而发挥相应的生物活性^[8]。具体而言,当多糖的相对分子质量过大时,庞大的体积会增大空间位阻,不利于其跨越多重细胞膜屏障进入生物体内发挥生物活性;而当多糖的相对分

收稿日期:2024-10-19;修回日期:2025-01-15;出版日期:2025-08-15

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(24B210015);国家自然科学基金面上项目(32072634)

作者简介:郭向阳(1987—),男,河南省信阳市人,信阳师范大学副教授,博士(后),主要研究方向为食品化学与资源利用。
E-mail:xiangyang.guo@ahau.edu.cn

子质量过小时,其过短的分子链无法形成稳定且有利于生物活性发挥的聚合结构,同样也会导致其生物活性降低或丧失^[9]。研究^[10]表明,具有(1,3)- β -D-葡聚糖结构的多糖,当其相对分子质量大于 9.0×10^4 kDa时,才能形成对免疫调节具有关键作用的三股螺旋结构。此外,不同多糖具备不同生物活性的最佳相对分子质量范围也不相同。一般认为,当多糖的相对分子质量大于16 kDa时才具有抗肿瘤活性。例如,相对分子质量为16 kDa的虫草多糖能够促进小鼠巨噬细胞的吞噬作用,而相对分子质量小于12 kDa的虫草多糖无此生物活性^[11];相对分子质量大于100 kDa且具有三股螺旋结构的裂褶菌多糖表现出强烈的抗肿瘤活性,相对分子质量小于50 kDa的裂褶菌多糖则无此生物活性,而相对分子质量为50~100 kDa的裂褶菌多糖的抗肿瘤活性较弱^[12]。鉴于天然多糖的相对分子质量普遍较大且分支较多,选择合适的降解方法有望获得期望的多糖产物。

目前,多糖的降解方法主要包括酶降解法、化学降解法、微生物降解法、物理降解法等^[13]。酶降解法利用非专一性或专一性酶降解多糖,其中,非专一性酶能够降解多种类型的多糖,但专一性较低;专一性酶一般难以获取且价格昂贵,限制了其在实际应用中的推广^[14]。化学降解法较难精确控制降解位点,且副反应生成的副产物会破坏多糖结构中的活性基团,耗能高且易导致环境污染^[15]。微生物降解法在降解多糖方面展现出巨大的应用潜力,但为了提高降解效率并提升降解产物的生物活性,还需对微生物菌种、发酵条件等关键参数进行严格筛选和优化^[16]。物理降解法是一种快速、高效的多糖降解方法,具有良好的可控性和简便性,包括微波法、辐射法、超声波法等^[17]。其中,超声波法因具有简单、快速、环保、高效、经济实惠等优点^[18],日益受到研究者的重视;另外,经超声波降解后,多糖的生物活性有所增强^[19-21],故该法已广泛应用于多糖的提取及改性研究中^[22-24]。因此,本文拟对超声波降解多糖的作用表现、影响因素及机理进行综述,以为多糖的深入研究及其在保健品、食品、药品等领域的广泛应用提供参考。

1 超声波降解多糖的作用表现

多糖经超声波降解后的物化性质、结构及生物活性均会发生相应改变,且改变程度与超声波降解的条件密切相关。

1.1 多糖物化性质改变

1.1.1 相对分子质量减小 多糖相对分子质量减小是超声波降解多糖的显著表现之一^[25-26]。经超声波降解后,多糖的相对分子质量减小,其分子链长度差异也会变小,从而导致其多分散性降低^[19,27-29]。R. H. Chen等^[28]通过分子质量分布范围(Molecular Weight Distribution Range, $MWDR = 1 - M_w/M_n$, 其中 M_w 表示超声波降解后的平均相对分子质量, M_n 表示未经超声波降解的平均相对分子质量)与超声时间的关系图,发现随着超声时间的延长, $MWDR$ 逐渐增大,即表明 M_w 逐渐减小。此外,凝胶渗透色谱(Gel Permeation Chromatography, GPC)或高效液相色谱(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)配备凝胶柱的示差检测分析谱图也显示,经超声波降解后,多糖组分的出峰时间较未经超声波降解有所延迟,表明超声波降解会导致多糖的相对分子质量减小。值得注意的是,超声波空化效应产生的剧烈高温可能诱发多糖类物质所形成的大分子自由基发生重组,导致多糖的相对分子质量增大,而条件较为温和的超声波处理可能对多糖相对分子质量的影响不明显^[21]。

1.1.2 溶液黏度降低 在超声波降解过程中,多糖的分子链被打断,形成更小的分子片段。当链长达到某个极限值时,超声波对多糖的降解将不再有效,溶液黏度也会下降至一个极限值并保持稳定^[30-31]。S. Baxter等^[32]研究了高强度超声波对壳聚糖的降解作用,发现特性黏度的减小比率与超声波强度呈线性增加关系。A. Azhar等^[33]在不同温度下利用超声波降解马铃薯淀粉,发现马铃薯淀粉的黏度显著降低,且降解温度越接近马铃薯淀粉的糊化温度,黏度越接近于零。超声波在降解黄精多糖^[34]或磷杯伞子实体多糖^[35]时,也会导致降解后较低相对分子质量多糖的表观黏度降低,并使猴头菌多糖的特性黏度随超声时间的延长而逐渐降

低^[36]。李苗苗等^[37]基于多糖经超声波降解后黏度会降低的特性,利用醋酸和过氧化氢辅助超声波降解黄原胶以制备低黏度膳食纤维,并在超声功率 350 W、超声频率 20 kHz、超声时间 3 h、过氧化氢添加量为 2% 的优化条件下将黄原胶黏度降至 600 mPa·s。

1.1.3 溶解度提高 超声波降解可显著提高多糖的溶解度^[38]。在超声波降解过程中,多糖的分子链会发生断裂,导致其相对分子质量减小,而较小的多糖分子更易在溶剂中分散,进而提高多糖的溶解度。同时,超声波降解可能会破坏多糖分子之间的氢键、范德华力等作用力,这有助于多糖分子在溶剂中的分散,进而提高其溶解度。另外,超声波降解可能使多糖分子中的亲水基团暴露,增强多糖分子与溶剂(如水)之间的相互作用,从而提高多糖溶解度。徐雅琴等^[26]研究发现,超声波降解可显著提高黑加仑果实多糖的溶解度,当超声时间为 15 min 时,该多糖的溶解度增加了 27.97%;继续延长超声时间至 30 min 时,该多糖的溶解度增加了 61.53%。类似研究^[39]也发现,超声波降解可显著提高长松藻多糖的溶解度。溶解度的提高不仅有助于促进多糖在生物体内的吸收和利用,增强多糖的生物活性^[40],还有助于促进多糖在食品加工和生产中的应用,如能改善多糖溶液的流动性和稳定性。虽然超声波降解可提高多糖的溶解度,但在实际应用中仍需考虑功率、时间、温度等超声波参数对多糖结构及生物活性的影响。

1.1.4 分子空间尺寸减小 经超声波降解后,多糖分子的长链被打断,形成较小的分子片段。这些分子片段或相互聚集形成团簇棒状结构,或散开形成均匀的网状结构^[41],且其空间尺寸均小于未经超声波降解的多糖^[42]。例如,柴胡多糖经超声波降解后,其微观结构无论从线度上还是高度上均有所减小^[43];银耳多糖经超声波和过氧化氢联合降解后,其颗粒尺寸从 710 nm 显著减小至 182 nm^[44];黄精多糖经超声波降解 8 h、16 h 和 24 h 后,其颗粒尺寸分别减小了 28.03%、46.15% 和 62.54%^[34]。

此外,超声波降解也会导致多糖其他物化性质的改变。马尾藻多糖经超声波降解后,其黏度降

低、弹性增强^[18]。高强度的超声波长时间作用于壳聚糖后,会显著影响其乙酰度^[45],但短时间作用对其乙酰度的影响不显著^[27,32]。超声波降解能提高壳聚糖结合脂肪的能力,并有助于改性后的壳聚糖成为食品添加剂的有效组分^[46]。碱性溶液中的异木聚糖经超声波降解后,其物化性质发生显著改变^[47],溶液黏度降低,并表现出弱凝胶特性。相较于未经超声波降解的黄精多糖,经超声波降解后的低相对分子质量黄精多糖的热稳定性降低^[34]。超声波辅助过氧化氢法可降解坛紫菜多糖,导致其相对分子质量及 3,6-内醚半乳糖、糖醛酸质量分数均显著降低,并提高其硫酸基质量分数^[48]。超声波降解还可显著改变多糖的溶解性等流变特性,进而影响其在食品、药品、化妆品等领域的开发与应用^[40,49]。

1.2 多糖结构改变

1.2.1 单糖组分改变 经超声波降解后,多糖的单糖组分及其物质的量之比可能会发生改变,而前者发生改变的可能性相对较小。与未经超声波降解的鸡腿菇多糖相比,经超声波降解后,鸡腿菇多糖的单糖组分及糖苷键型均有所改变^[50],且有微量的半乳糖转变成了葡萄糖^[51]。

1.2.2 单糖结构改变 超声波降解不会造成多糖初级结构的改变,但会引起多糖化学键断裂及原子重排,且自由基氧化反应过程中也可能形成 C=O^[52]。例如,超声波降解可导致鸡腿菇多糖的单糖结构发生改变,具体表现为半乳糖转变成了葡萄糖^[53]。另外,超声波辅助提取法会破坏鸡腿菇多糖中较易断裂的糖链末端结构,使 C=O 断裂为 C—O,还会破坏糖链上的—COOH,最终导致多糖链外层的酸性糖转变为中性糖^[54]。

1.2.3 多糖分子空间结构改变 多糖分子空间结构的改变也是超声波降解多糖过程中的一种重要表现^[55-56]。在超声波降解过程中,形成的空穴在破碎时产生的瞬间高温和高压会破坏多糖结构中的链内及链间氢键,进而导致多糖分子空间结构改变。未经超声波降解的茯苓核多糖呈现链相互缠绕的网状空间结构,而经超声波降解后,茯苓核多糖的分子链被降解为更小的分子片断,并相互聚集

形成团簇棒状结构^[57-58]。赵凯^[59]利用扫描电子显微镜和原子力显微镜分析了超声波所提取麦冬多糖的结构,发现其片状结构及糖链的分子片段均变小。此外,超声波降解也会影响多糖的表观形貌。例如,严碧歌等^[60]利用扫描电子显微镜观察麦冬多糖的外观形貌,发现经超声波降解后其片状结构变小甚至出现碎屑状。J. Zhu 等^[61]通过小角 X 射线散射仪观察超声波降解后的马铃薯淀粉颗粒,发现其表面出现沟和凹槽,且随着超声功率的增加,分形结构从表面分形转变为质量分形,表明致密的淀粉颗粒结构变得松散且发生了更大程度的膨胀。J. R. Xiao 等^[62]研究发现,超声波降解还可破坏部分金针菇多糖三螺旋结构的稳定性。

1.2.4 多糖结晶度和晶体类型改变 叶君等^[63]利用 20 kHz 且功率不同的超声波降解纸浆,发现纤维素的结晶度升高;类似现象也在经超声波降解的纤维素超分子结构中被观察到^[64];但吴卫成等^[65]研究发现,甘薯皮膳食纤维经超声波降解后,其结晶度会下降,这可能与多糖种类不同有关。在超声波降解过程中,纤维素的晶体类型保持不变,仍是 B-byte 构型^[63],J. Zhu 等^[61-66]的研究也有类似结论。此外,相较于无定形区支链淀粉,超声波降解对结晶区直链淀粉晶体结构的影响更大^[67]。

1.3 多糖生物活性改变

多糖经超声波降解后,可在一定程度上得到纯化^[68],其相对分子质量变小,分子聚集体或沉淀物变得更小或更分散,空间结构也会发生改变^[69],且可能生成羰基、醛基、硫酸酯等新基团;同时,氢键及分子间作用力减弱,水溶性增强,活性部位与自由基的接触面积增加,这有利于改善或增强多糖的抗氧化和免疫调节活性^[70-71]。超声波降解会影响玉米芯木聚糖的免疫调节活性,但低功率、短时间的超声波降解对其影响不显著^[72]。红枣多糖^[73]、银耳多糖^[44]及磷杯伞子实体多糖^[35]经超声波降解后,其体外抗氧化活性均得到增强。猴头菌多糖经超声波降解后,可增加巨噬细胞的 NO 释放量^[36],表明超声波降解能够增强多糖的免疫调节活性。徐雅琴等^[74]研究发现,黑穗醋栗果实多糖经超声波降解后,其对糖基化反应产物均具有较好的抑制作

用,且有一定的降血糖活性。阿拉伯半乳聚糖经超声波辅助降解后,其抗氧化活性显著增强,且在超声时间 60 min、多糖质量浓度 10 g/L、反应温度 60 ℃、过氧化氢体积分数 6% 的最佳降解条件下,对 $\cdot\text{OH}$ 自由基的清除率达到 89.6%^[75]。W. Liu 等^[34]研究发现,经超声波降解 16 h 的黄精多糖降解产物有利于胰高血糖素样肽-1 (Glucagon-Like Peptide-1, GLP-1) 的分泌;经超声波降解 8 h 的低相对分子质量黄精多糖能够清除 DPPH、ABTS⁺、 $\cdot\text{OH}$ 及 $\cdot\text{O}_2^-$ 自由基,具有较强的抗氧化活性;经超声波降解 24 h 的低相对分子质量黄精多糖对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制活性均较强。金针菇多糖经超声波降解后,所得低相对分子质量多糖能够有效促进双歧杆菌等肠道有益菌生长,同时抑制有害菌生长,表现出更好的益生元活性^[62]。然而,在超声波降解过程中,糖链上结合蛋白的解离会不同程度地减弱龙眼多糖对体外免疫活性的调节作用^[76]。超声波提取麦冬多糖的过程中,其对活性物质的破坏可能导致麦冬多糖丧失对 $\cdot\text{O}_2^-$ 自由基的清除作用^[59]。还有研究^[77]发现,随着超声功率的增加,麦冬多糖的抗氧化活性呈先增加后减小的趋势,在超声功率为 400 W 时,麦冬多糖清除 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 及 DPPH 自由基的能力最强。

超声波与过氧化氢或维生素 C 联用会在一定程度上增强多糖降解的效果。铁皮石斛多糖经超声波与过氧化氢联合降解后,可提高小鼠巨噬细胞 (RAW264.7) 的 NO 释放量及肿瘤坏死因子 (Tumor Necrosis Factor- α , TNF- α) 的分泌量^[78]。人参多糖经超声波与过氧化氢-维生素 C 联合降解后,其主要官能团结构及单糖种类均未发生改变,但所得低相对分子质量多糖的抗氧化活性和降血糖活性均显著增强^[79]。

综上所述,超声波降解能改变多糖的物化性质、结构及生物活性,这为多糖资源的利用与开发开辟了新的路径和方法。在物化性质方面,超声波降解会导致多糖相对分子质量、分子空间尺寸减小、溶液黏度降低及溶解度提高;在多糖结构方面,超声波降解既会改变多糖中单糖的组分和结构,还会改变多糖分子的空间结构、结晶度和晶体类型;

在生物活性方面,经超声波降解的多糖表现出更好的抗氧化、免疫调节、降血糖等活性。需要注意的是,功率、时间等超声波参数对多糖降解的效果具有重要影响,过高的超声功率或过长的超声时间可能导致多糖结构的过度破坏,进而影响其生物活性。因此,在实际应用过程中,应根据实际需求选择适宜的超声波参数。

2 超声波降解多糖的影响因素

2.1 多糖相对分子质量

研究^[31,72]表明,多糖的降解程度或糖苷键的断裂数与其相对分子质量呈正相关,多糖的相对分子质量越大,超声波的降解效果越明显。然而,超声波对多糖的降解效果存在相对分子质量极限值,当相对分子质量低于该极限值时,多糖不易被超声波降解,而该极限值的大小主要取决于超声强度及多糖的种类和来源^[17,31]。

2.2 温度

升高温度通常不利于超声波降解多糖,这是因为高温会使多糖溶液体系中的蒸汽压升高、黏度降低,这些变化虽有利于空化气泡的形成和逸出,但会对多糖的降解效果产生不利影响^[29]。因此,温度越高,多糖的降解速率反而越低,而较低温度条件下,超声波降解多糖的效果相对更显著^[80]。有研究^[81]发现,冰浴时的温度可能是最有利于超声波降解多糖的温度,在超声波降解其他聚合物的研究中也类似发现^[82]。但 X. H. Zhu 等^[30]研究发现,高温有利于超声波的空穴效应,多糖的降解速率会随着温度的升高而升高。上述研究结果的差异可能与多糖的种类、来源、结构特征及 pH 值、离子强度、其他化学物质等实验环境条件有关。多糖的结构复杂多变,不同种类的多糖在溶解度、稳定性、热敏性等方面均存在显著差异^[83],因此对高温的响应会有所不同。此外,高温可能会影响或破坏多糖的单糖组成、分子的聚集和降解等结构特征,进而影响多糖的物化性质和生物活性^[84]。

2.3 超声功率

作用于多糖的超声功率越大,多糖的降解速率越快,越容易被降解^[25],且降解后多糖的平均相对

分子质量的分散性也越小^[85]。研究^[86]发现,超声功率与油茶籽粕多糖的降解效果呈正相关,即随着超声功率的增大,油茶籽粕多糖的降解效果增强。

2.4 超声频率

超声频率虽与降解速率之间无明显相关性,但不同超声频率下降解多糖的断键机理是不同的。例如,当使用超过 500 kHz 的超声波降解葡聚糖时,主要是自由基氧化还原反应机理起作用;而在 35 kHz 的低超声频率下,断键的主要机理则是超声波的机械断键作用^[87]。

2.5 超声时间

随着超声时间的延长,多糖的降解量会逐渐增加,但达到一定程度后会处于平衡状态^[28]。E. Machová 等^[81]研究发现,超声波降解 0 ~ 100 min 内,多糖在前 30 min 的降解量最大。R. H. Zhu 等^[30]也有类似的结论。这可能与超声波降解过程中多糖相对分子质量的极限值有关。当多糖被降解到一定程度后,其相对分子质量减小到极限值以下就很难被继续降解。因此,在超声波降解最初阶段,多糖的降解量是逐渐增加的,当超声波降解一段时间后,多糖的降解量会趋于平缓。

2.6 多糖溶液质量浓度

多糖溶液的质量浓度与超声波对多糖的降解效果呈负相关,随着多糖溶液质量浓度的增加,超声波对多糖的降解效果会逐渐减弱^[62]。这可能是因为多糖溶液的质量浓度越大,溶液的黏度越大、流动性越差,这会对超声波的传播产生较大的阻碍作用,致使到达多糖分子的有效超声波能量降低,最终导致超声波对多糖的降解效果减弱^[30]。在同等条件下,随着多糖溶液质量浓度的降低,超声波对多糖的降解速率会增大,糖苷键断裂的数量也会增多^[80,88]。但需要注意的是,多糖溶液质量浓度并非越小越好,而是存在一个临界质量浓度,其与多糖的来源有关。例如,对于红藻多糖,0.75 g/dL 的溶液比 0.50 g/dL 的溶液更易发生降解,前者可能是红藻多糖的临界质量浓度^[88]。另外,多糖溶液质量浓度对超声波降解速率的影响还与其黏度有关,多糖溶液黏度越大,其质量浓度越大,超声波降解过程中越不易形成空穴效应。当超声波输出的能

量相同时,降解多糖所需能量会随着多糖溶液质量浓度的增加而被稀释,使得超声波对多糖的降解效果减弱,但当多糖溶液的初始黏度相同时,降解速率会随着多糖溶液质量浓度的增加而增大^[31]。

2.7 多糖溶液酸碱性

多糖在碱性介质中更易被超声波降解,这可能是因为碱性条件能够促进多糖的降解^[89]。而在 pH 值为 2.0~3.5 的酸性条件下,多糖的降解速率会随着溶液 pH 值的增加而降低^[30],这可能与低 pH 值条件下,经超声波降解的多糖易产生会攻击糖苷键并使其断裂的·OH 自由基有关。R. H. Chen 等^[28]研究发现,溶剂的类型对超声波降解壳聚糖的速率没有显著影响,但可能与其酸性介质有关。有关多糖溶液的酸碱性对其降解效果影响的确切机理仍有待深入研究。

2.8 多糖溶液黏度

多糖溶液黏度越大,越不利于超声波降解下多糖溶液中空穴效应的形成^[29]。因此,多糖溶液的黏度越低,越有利于超声波降解。当超声波降解多糖的能量相同时,降解速率主要取决于多糖溶液的初始黏度^[31]。这可能是因为,在高黏度溶液中,空穴崩塌的强度要高于低黏度溶液,因此多糖溶液的初始黏度越高,降解速率反而越快。

2.9 乙酰度

具有低乙酰度的壳聚糖更易在超声波作用下发生降解,且经高脱乙酰作用的壳聚糖展现出相对更高的降解速率^[27,65]。这可能是因为脱乙酰作用会使壳聚糖分子结构膨胀,并降低其糖苷键能量,使这些键更易在超声波降解时发生断裂。

综上所述,超声波降解多糖主要受多糖相对分子质量、温度、超声功率、超声频率等多种因素的影响。其中,升高温度或增大超声功率可加速多糖降解速率,但过高的温度可能破坏多糖的结构或产生其他副产物;延长超声时间可增加多糖的降解量,但当多糖的相对分子质量减小到极限值以下时,继续延长超声时间对多糖降解量的影响效果不明显;多糖溶液质量浓度和酸碱性均会影响多糖的稳定性,进而影响超声波的降解效果;多糖溶液黏度和乙酰度则与多糖的物化性质密切相关,会间接影响

超声波的降解效果。因此,在实际应用中,需综合考虑上述因素,以实现多糖的高效、可控降解。

3 超声波降解多糖的机理

超声波是一种频率介于 20~100 kHz 的机械波,其波速通常为 1500 m/s,波长一般为 0.01~10 cm。超声波不仅是一种波动形式,还是一种能量形式,能通过与媒介的相互作用(如机械作用、空穴作用、热作用等)产生多种超声效应^[90]。

3.1 超声波的机械断键作用

超声波作为机械能量的传播形式,会产生线性交变的振动效应。当超声波在流体介质中传播时,介质中的质点在超声波的作用下具有极高的运动加速度,从而产生快速变化的机械运动,使多糖等大分子聚合物的共价键断裂,实现降解的目的^[25,91]。但机械运动的作用强度与多糖的相对分子质量密切相关,例如,当葡聚糖的相对分子质量小于 40 000 kDa 时,超声波的机械断键作用会显著减弱^[87]。

3.2 超声波的空穴效应

在超声波反应液中往往会存在一些可能处于真空状态或含有少量气体或蒸汽的小泡,这些小泡在超声波的作用下会逐渐变大,当超过媒质分子之间的极限距离时就会产生空穴。而空穴破碎时会产生瞬间的高温和高压,这种极端条件能够促使多糖等大分子聚合物的分子链发生断裂^[66,92]。

3.3 自由基氧化还原反应

自由基氧化还原反应的断键机理^[40,91]与超声波反应液中产生的空穴效应密切相关。当反应液中的空穴破碎时,产生的瞬间高温和高压可为体系中的自由基反应提供所需的活化能。在高温和高压条件下,反应液中的分子键,包括糖链上的化学键易断裂形成自由基。这些自由基的活性很高,能够迅速与其他分子发生氧化还原反应,从而导致糖链断裂,而这种断裂作用是实现多糖有效降解的关键步骤之一。因此,超声波反应液中的空穴效应不仅为自由基的生成提供了有利环境,还极大地促进了自由基氧化还原反应的发生,进而实现了多糖的有效降解。

值得注意的是,超声波的机械断键作用、空穴效应和自由基氧化还原反应在降解多糖过程中并非同时起作用,而是受多糖相对分子质量、超声波强度、溶剂性质等多种因素的影响^[93]。多糖的相对分子质量越大,可能越易受到机械断键作用的影响。超声波强度则直接决定了空穴效应的产生效率和强度,进而影响自由基的生成和氧化还原反应的发生;而溶剂性质则可能影响自由基的稳定性和反应活性,进而间接影响多糖的降解效果。这些因素相互作用,共同决定了超声波在降解多糖过程中的具体作用机制和效果。例如,在 360 kHz 超声波降解壳聚糖和淀粉过程中,机械断键作用和自由基氧化还原反应会共同发挥作用^[90]。另外,反应液的 pH 值较低时,容易形成 $\cdot\text{OH}$ 自由基,这有利于多糖降解过程中自由基氧化还原反应的发生^[87]。超声降解多糖是一个复杂的过程,涉及多种机理的协同作用,可通过合理调控超声波参数和操作条件,实现对多糖降解过程的精确控制。

4 结论与展望

本文综述了超声波法在多糖降解研究领域的应用现状,并深入探讨了超声波降解多糖的作用表现、影响因素、机理等的研究进展,认为:超声波降解可有效降低多糖的相对分子质量、溶液黏度及分子空间尺寸,显著提升其溶解度,并可导致其多分散性降低,微观结构趋于均匀化,形成团簇棒状或网状结构。超声波降解还可引发多糖的单糖组分、单糖结构、分子空间构型及结晶状态的显著变化,但晶体类型通常保持不变。另外,超声波降解通过改变多糖的分子结构和物化性质,显著提升了其抗氧化、免疫调节、降血糖等生物活性,但超声功率过高或超声时间过长时,可能会导致多糖结构被破坏,削弱其生物活性,因此需对降解条件进行优化。超声波降解主要通过机械断键、空穴效应及自由基氧化还原反应协同作用实现多糖的降解。机械断键作用受多糖相对分子质量的影响显著,空穴效应产生的瞬间高温和高压是降解的关键因素,自由基氧化还原反应则进一步加速了糖链的断裂。降解效果受多糖相对分子质量、温度、超声功率、超声频

率、超声时间、溶液质量浓度、酸碱性、黏度、乙酰度等多种因素综合影响,实际应用中应结合多糖种类及需求优化参数,调控降解过程。然而,目前超声波降解多糖的研究种类较单一,主要集中在壳聚糖、纤维素、真菌多糖及部分食用菌类多糖,而针对超声波降解前后多糖的结构及生物活性变化的研究仍显不足。因此,未来的研究应加强超声波对多糖结构及其生物活性影响的基础研究,通过构建适宜的实验模型,深入剖析超声波处理前后多糖结构的变化规律,并厘清这些结构与生物活性之间的内在关联;系统研究同源类多糖的超声降解条件,同时研究各超声波参数作用于同源类多糖时的极限值,确定超声波可控降解目标相对分子质量多糖的条件;基于多糖糖链中相关糖苷键键能大小优化计算超声波强度的方法,实现糖苷键的定向裂解;拓展超声波降解多糖的研究范围,针对不同来源的多糖,系统探究其超声波降解条件;紧密结合实验数据,建立更准确的动力学模型来描述超声波降解多糖的过程;注重超声波在多糖降解领域的实际应用,以推动超声波技术的工业化应用进程。

参考文献:

[1] BOATENG I D, GUO Y Z, YANG X M. Extraction, purification, structural characterization, and antitumor effects of water-soluble intracellular polysaccharide (IPSW-1) from *Phellinus igniarius* mycelia [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(36): 19721–19732.

[2] 阿卜杜拉·玉苏普, 周丽楠, 木合塔尔·吐尔洪, 等. 库鲁木提草多糖成分及其抗病毒活性研究 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2024, 57(1): 1–5.

[3] HUANG F, FAN Y B, LIU X X, et al. Structural characterization and innate immunomodulatory effect of glucomannan from *Bletilla striata* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273: 133206.

[4] 丁孟汝, 王国栋, 袁平川, 等. 多糖调控糖脂代谢的作用及其机制研究进展 [J]. 南方医科大学学报, 2021, 41(3): 471–475.

[5] YAN T T, SUN J H, ZHANG Y Y, et al. *Enteromorpha prolifera* polysaccharide alleviates acute alcoholic liver injury in C57 BL/6 mice through the gut-liver axis and NF- κ B pathway [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(42): 23258–23270.

[6] 孔子汉, 虎峻瑞, 段永强, 等. 白及多糖对胃溃疡模型

- 大鼠血清 IL-2R、IL-4 及胃组织 Caspase-8 水平的影响[J]. 中国中医药信息杂志, 2019, 26(10): 35-39.
- [7] SONG Q Y, LIU Z Q, ZHAO B Y. Structural characterization and antioxidant activity in aging mice of a homogeneous polysaccharide isolated from *Ecklonia kurome* [J]. Journal of Molecular Structure, 2024, 1318: 139111.
- [8] ZHOU C S, YU X J, ZHANG Y Z, et al. Ultrasonic degradation, purification and analysis of structure and antioxidant activity of polysaccharide from *Porphyra yezoensis* Ueda [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(3): 2046-2051.
- [9] 钟昕, 周素梅, 王强. 药用真菌多糖研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(9): 97-101.
- [10] MANTOVANI M S, BELLINI M F, ANGELI J P F, et al. β -glucans in promoting health: Prevention against mutation and cancer [J]. Mutation Research, 2008, 658(3): 154-161.
- [11] 龚敏, 朱勤, 王彤, 等. 冬虫夏草多糖的分子结构与免疫活性[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 1990(6): 486-492.
- [12] 叶诚, 周蓬蓬, 余龙江, 等. 高相对分子质量裂褶多糖的制备与结构鉴定[J]. 生命科学研究, 2007, 11(2): 100-104.
- [13] WU Q, QIN D D, CAO H X, et al. Enzymatic hydrolysis of polysaccharide from *Auricularia auricula* and characterization of the degradation product [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 127-135.
- [14] SHI M J, WANG F, JIANG H, et al. Effect of enzymatic degraded polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* on the physical and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions [J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126774.
- [15] HOU Z Q, WANG W K, WANG Y Y, et al. Rapid characterization of polysaccharides from marine animals using chemical degradation combined with liquid chromatography mass spectrometry [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 291: 138535.
- [16] WANG Z C, ZHENG Y, ZHOU X Y, et al. Effect of *Lactobacillus* fermentation on the structural feature, physicochemical property, and bioactivity of plant and fungal polysaccharides: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 148: 104492.
- [17] 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.
- [18] ZHANG Y L, DOU Z M, LI S S, et al. An ultrasonic degraded polysaccharide extracted from *Pueraria lobata* ameliorate ischemic brain injury in mice by regulating the gut microbiota and LPS-TLR4 pathway [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 112: 107200.
- [19] YUAN D, LI C, HUANG Q, et al. Ultrasonic degradation effects on the physicochemical, rheological and antioxidant properties of polysaccharide from *Sargassum pallidum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116230.
- [20] TANG W, LIN L H, XIE J H, et al. Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 305-312.
- [21] QUE Y X, ZHANG Y, LIANG F X, et al. Structural characterization, antioxidant activity, and fermentation characteristics of *Flammulina velutipes* residue polysaccharide degraded by ultrasonic assisted H_2O_2 -Vc technique [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107085.
- [22] WANG Z C, ZHOU X Y, SHENG L L, et al. Effect of ultrasonic degradation on the structural feature, physicochemical property and bioactivity of plant and microbial polysaccharides: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123924.
- [23] CHEN G J, BU F, CHEN X H, et al. Ultrasonic extraction, structural characterization, physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 656-666.
- [24] CHEN R Z, REN X, YIN W, et al. Ultrasonic disruption extraction, characterization and bioactivities of polysaccharides from wild *Armillaria mellea* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 1491-1502.
- [25] YANG H H, BAI J W, MA C L, et al. Degradation models, structure, rheological properties and protective effects on erythrocyte hemolysis of the polysaccharides from *Ribes nigrum* L. [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 738-746.
- [26] 徐雅琴, 杜明阳, 杨露, 等. 超声波处理对黑加仑果实多糖性质与生物活性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 148-153.
- [27] WU T, ZIVANOVIC S, HAYES D G, et al. Efficient reduction of chitosan molecular weight by high-intensity ultrasound: Underlying mechanism and effect of process parameters [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(13): 5112-5119.
- [28] CHEN R H, CHANG J R, SHYUR J S. Effects of ultrasonic conditions and storage in acidic solutions on changes in molecular weight and polydispersity of treated chitosan [J]. Carbohydrate Research, 1997, 299(4): 287-294.
- [29] LORIMER J P, MASON T J, CUTHBERT T C, et al. Effect of ultrasound on the degradation of aqueous native dextran [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2(1): S55-S57.
- [30] ZHU X H, ZHANG H L, YAN H, et al. Kinetics of degradation of *Lycium barbarum* polysaccharide by ultrasonication [J]. Journal of Polymer Science Part B (Polymer Physics), 2010, 48(5): 509-513.
- [31] ANTTI G, PENTTI P, HANNA K. Ultrasonic degradation of aqueous carboxymethylcellulose: Effect of viscosity, molecular mass, and concentration [J]. Ultrasonics Sono-

- chemistry, 2008, 15(4): 644–648.
- [32] BAXTER S, ZIVANOVIC S, WEISS J. Molecular weight and degree of acetylation of high-intensity ultrasonicated chitosan[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(5): 821–830.
- [33] AZHAR A, HAMDY M K. Sonication effect on potato starch and sweet potato powder[J]. Journal of Food Science, 1979, 44(3): 801–804.
- [34] LIU W, QIN Y M, SHI J Y, et al. Effect of ultrasonic degradation on the physicochemical characteristics, GLP-1 secretion, and antioxidant capacity of *Polygonatum cyrtoneuma* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133434.
- [35] 郭蓉, 常明昌, 程艳芬, 等. 不同方法降解对麟杯伞子实体多糖理化性质与活性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 123–131.
- [36] 李彩金, 杨焱, 吴迪, 等. 超声降解对猴头菌多糖的理化性质及体外免疫活性的影响[J]. 食用菌学报, 2017, 24(4): 44–49.
- [37] 李苗苗, 王寿权, 陈健, 等. 超声波降解黄原胶制备低黏膳食纤维[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 288–290.
- [38] WANG Z M, CHEUNG Y C, LEUNG P H, et al. Ultrasonic treatment for improved solution properties of a high-molecular weight exopolysaccharide produced by a medicinal fungus[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5517–5522.
- [39] 严尚隆, 潘创, 杨贤庆, 等. 长松藻多糖降解、结构表征及降血糖活性测定[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 119–126.
- [40] 王子朝, 张迪, 盛丽丽, 等. 超声降解影响多糖理化特性和生物活性研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 121–126.
- [41] 李连启. 鸡腿菇多糖 AP1 结构表征及超声提取对其结构影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [42] 孙润广, 张静, 王博, 等. 超声萃取参量对几种中药多糖结构影响的研究[C]//中华中医药学会. 中华中医药学会 2008 年药用植物化学与中药有效成分分析研讨会论文集. 2008: 1–12.
- [43] 李岱, 张静, 孙润广. 超声波处理对柴胡多糖提取率、微观形貌特征及生物活性的影响[J]. 生物加工过程, 2009, 7(2): 29–34.
- [44] LI M, MA F M, LI R, et al. Degradation of *Tremella fuciformis* polysaccharide by a combined ultrasound and hydrogen peroxide treatment: Process parameters, structural characteristics, and antioxidant activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 979–990.
- [45] LIU H, BAO J G, DU Y M, et al. Effect of ultrasonic treatment on the biochemophysical properties of chitosan[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(4): 553–559.
- [46] CZECHOWSKA-BISKUP R, ROKITA B, ULANSKI P, et al. Radiation-induced and sonochemical degradation of chitosan as a way to increase its fat-binding capacity[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B(Beam Interactions with Materials and Atoms), 2005, 236(1/2/3/4): 383–390.
- [47] EBRINGEROVÁ A, HROMÁDKOVÁ Z. The effect of ultrasound on the structure and properties of the water-soluble corn hull heteroxylan[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(4): 305–309.
- [48] 黄海潮, 王锦旭, 潘创, 等. 超声波辅助过氧化氢法降解坛紫菜多糖及其抗氧化活性的研究[J]. 南方水产科学, 2020, 16(1): 110–119.
- [49] 袁洪洁. 产朊假丝酵母 β -葡聚糖的增溶改性及其活性评价研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- [50] 李连启, 刘娜女, 杜柯, 等. 超声提取对鸡腿菇多糖 AP1 结构的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 32–36.
- [51] 刘娜女, 张静, 孙润广, 等. 超声对鸡腿菇多糖结构及生物活性的影响[J]. 化学学报, 2011, 69(15): 1824–1832.
- [52] CZECHOWSKA-BISKUP R, ROKITA B, LOTFY S, et al. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 60(2): 175–184.
- [53] 刘娜女. 超声对鸡腿菇多糖结构和活性影响机理及构效关系研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [54] 刘娜女, 张静, 李岱, 等. 利用傅里叶红外光谱和原子力显微镜研究超声提取对鸡腿菇多糖结构的影响[J]. 生物加工过程, 2010, 8(1): 56–60.
- [55] CHEUNG Y C, YIN J Y, WU J Y. Effect of polysaccharide chain conformation on ultrasonic degradation of curdlin in alkaline solution[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 195: 298–302.
- [56] 夏强, 黄丹菲, 余强, 等. 超声解聚对大粒车前子多糖流变性质、溶液构象及活性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(17): 80–85.
- [57] 王博. 超声萃取对茯苓菌核多糖提取率及结构影响的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [58] 王博, 孙润广, 张静. 超声波强化提取对茯苓水溶性多糖结构影响的研究[J]. 应用声学, 2009, 28(3): 195–202.
- [59] 赵凯. 超声波对麦冬多糖的提取率、结构及抗氧化活性的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [60] 严碧歌, 赵凯, 杜柯. 超声波提取对麦冬多糖结构和抗氧化活性的影响[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 859–862.
- [61] ZHU J, LI L, CHEN L, et al. Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 116–122.
- [62] XIAO J R, CHEN X, ZHAN Q P, et al. Effects of ultrasound on the degradation kinetics, physicochemical properties and prebiotic activity of *Flammulina velutipes* polysaccharide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 82: 105901.
- [63] 叶君, 梁文芷, 范佩明, 等. 超声波处理引起纸浆纤维素结晶度变化[J]. 广东造纸, 1999, 18(2): 6–10.
- [64] 熊键, 叶君, 梁文芷. 超声方法对纤维素超分子结构的

- 影响[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 66-70.
- [65] 吴卫成, 戴建波, 曹艳, 等. 物理改性对甘薯皮膳食纤维含量、多糖组成及其结构的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 490-498.
- [66] 杨书会. 超声辅助纤维素酶提取银耳多糖工艺优化及在蛋白饮料中的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [67] 欧阳群富. 超声处理对不同晶型淀粉的结构及理化性能的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [68] LIU Q M, XU S S, LI L, et al. *In vitro* and *in vivo* immunomodulatory activity of sulfated polysaccharide from *Porphyra haitanensis* [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 165: 189-196.
- [69] CARMONA-GARCÍA R, BELLO-PÉREZ L A, AGUIRRE-CRUZ A, et al. Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with different granule size [J]. Starch-Stärke, 2016, 68(9/10): 972-979.
- [70] YAN J K, WANG Y Y, MA H L, et al. Ultrasonic effects on the degradation kinetics, preliminary characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Phellinus linteus* mycelia [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 251-257.
- [71] JIANG S, WU X T, SHI X P, et al. Extraction of *San-guisorba officinalis* L. polysaccharide by ultrasound-assisted extraction: Structural characterization, antioxidant, hemostatic and immunological activity [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 115: 107292.
- [72] EBRINGEROVÁ A, HRMÁDKOVÁ Z, HRÍBALOVÁ V, et al. Effect of ultrasound on the immunogenic corn cob xylan [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(4): 311-315.
- [73] 郭建行, 谢俊杰, 阳小雨, 等. 红枣多糖降解条件优化及抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(1): 99-106.
- [74] 徐雅琴, 刘菲, 郭莹莹, 等. 黑穗醋栗果实超声波降解多糖的结构及抗糖基化活性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 295-300.
- [75] 张海芸, 贺亮, 李琴, 等. 超声波法辅助定向降解阿拉伯半乳聚糖的研究[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(4): 61-68.
- [76] 闵婷, 孙杰, 黄菲, 等. 超声处理对龙眼果肉多糖理化特征及免疫调节活性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 124-131.
- [77] WANG X M, ZHANG T Z, ZHANG W F, et al. Antioxidant activity *in vitro* of polysaccharide extracted by ultrasound with different powers from *Ophiopogon japonicus* [J]. American Journal of Plant Sciences, 2018, 9(9): 1826-1834.
- [78] 赵小丹, 刘玉, 陶新玉, 等. 不同相对分子质量的铁皮石斛多糖对细胞免疫活性的影响[J]. 中国药学杂志, 2023, 58(11): 997-1004.
- [79] 王尧, 李福蕊, 罗源, 等. 超声波辅助 H_2O_2 -VC 降解人
- 参多糖对其结构特征与生物活性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 82-90.
- [80] PU Y Y, ZOU Q S, HOU D Z, et al. Molecular weight kinetics and chain scission models for dextran polymers during ultrasonic degradation [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 156: 71-76.
- [81] MACHOVÁ E, KVAPILOVÁ K, KOGAN G, et al. Effect of ultrasonic treatment on the molecular weight of carboxymethylated chitin-glucan complex from *Aspergillus niger* [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1999, 5(4): 169-172.
- [82] VIJAYALAKSHMI S P, MADRAS G. Effect of temperature on the ultrasonic degradation of polyacrylamide and poly(ethylene oxide) [J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 84(2): 341-344.
- [83] 何余堂, 潘孝明. 植物多糖的结构与活性研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 493-496.
- [84] 吴兰兰, 吴钢, 谭强来, 等. 煮制对多花黄精多糖结构及其体外免疫刺激活性的影响[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(6): 28-34.
- [85] ZHONG K, ZHANG Q, TONG L T, et al. Molecular weight degradation and rheological properties of schizophyllan under ultrasonic treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23: 75-80.
- [86] 方芳, 杨丹, 张超, 等. 油茶籽粕多糖超声辅助盐酸降解工艺及动力学研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 188-193.
- [87] PORTENLÄNGER G, HEUSINGER H. The influence of frequency on the mechanical and radical effects for the ultrasonic degradation of dextrans [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(2): 127-130.
- [88] ZHOU C S, MA H L. Ultrasonic degradation of polysaccharide from a red algae (*Porphyra yezoensis*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2223-2228.
- [89] 李哲斌, 杨艳玲. 红枣多糖生物活性及开发利用研究进展[J]. 食品科技, 2024, 49(11): 234-240.
- [90] ZHANG H X, LIU F F, WU P, et al. Degradation of (1→3)(1→6)- α -D-dextran by ultrasound: Molecular weight, viscosity and kinetics [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283(Pt 2): 137446.
- [91] WANG H S, CHEN J R, REN P F, et al. Ultrasound irradiation alters the spatial structure and improves the antioxidant activity of the yellow tea polysaccharide [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105355.
- [92] 邱军强, 张华, 刘迪迪, 等. 超声波处理对多糖理化性质和生物活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 189-193.
- [93] NACHTIGALL C, ROHM H, JAROS D. Degradation of exopolysaccharides from lactic acid bacteria by thermal, chemical, enzymatic and ultrasound stresses [J]. Foods, 2021, 10(2): 396.

Research progress on ultrasonic degradation of polysaccharides :
Effects ,influencing factors ,and mechanisms

GUO Xiangyang^{1,2,3} ,WANG Lulu⁴ ,MA Jingke¹ ,JIN Keting¹

1. College of Tea and Food Science ,Xinyang Normal University ,Xinyang 464000 ,China ;

2. Dabie Mountain Laboratory ,Xinyang 464000 ,China ;

3. College of Chemical and Environmental Engineering ,Shenzhen University ,Shenzhen 518060 ,China ;

4. College of Horticulture ,Shanxi Agricultural University ,Taigu 030801 ,China

Abstract: Polysaccharide bioactivity is closely associated with their molecular weight. Ultrasonic technology featuring simplicity, rapidity, environmental friendliness, and high efficiency has attracted increasing attention for degrading polysaccharides and enhancing their bioactivities. This review provided current advances in understanding ultrasonic degradation effects, mechanisms, and influencing factors. It demonstrated that ultrasonic degradation effectively modifies physicochemical properties by reducing molecular weight, solution viscosity, and particle size while improving solubility. Simultaneously, it induces structural changes in monosaccharide composition, molecular conformation, and crystallization patterns, thereby enhancing antioxidant, immunomodulatory, and hypoglycemic activities. The degradation mechanisms involve mechanical bond cleavage, cavitation effects, and free radical redox reactions, which are modulated by multiple factors including initial molecular weight, temperature, ultrasonic power, and frequency. Practical applications require parameter optimization based on polysaccharide type and desired outcomes. Current research predominantly focuses on limited polysaccharide types. Future directions include elucidating structure-activity relationships, exploring homologous polysaccharide degradation limits, developing targeted glycosidic bond cleavage strategies, analyzing structure-bioactivity correlations, expanding degradation conditions, constructing precise kinetic models, and advancing industrial applications to achieve precise degradation control.

Key words: polysaccharide ;ultrasonic degradation ;physicochemical property ;biological activity ;influencing factor ;degradation mechanism

[责任编辑:杨晓娟]