



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. DOI: 10. 12187/2023. 03. 007

植物多糖降解方法及降解产物特性研究进展

冀晓龙^{1,2,3}, 郭建行¹, 田静源¹, 马科¹, 刘延奇^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;
3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450001

摘要: 基于植物多糖降解的必要性, 综述了植物多糖的降解方法及降解产物的理化性质和生物活性, 认为: 物理降解法降解效率高、绿色环保、操作简单, 但存在降解不彻底、反应不充分、生产成本高等不足; 化学降解法简便易行、对降解设备要求低, 但存在降解产物不易分离、污染环境等问题; 生物降解法反应条件温和、降解速率快且产物均一, 但存在降解成本高、对条件要求严格等不足; 多种降解方法协同使用可弥补单一降解方法的不足, 提高植物多糖的降解效率; 降解可显著降低植物多糖的分子质量、特性黏度, 提高植物多糖的抗氧化、抗肿瘤、抗炎、降血糖、降血脂等生物活性。未来可在开发操作简单、绿色环保、定向降解、产物均一的降解方法、降解产物高级结构与生物活性的构效关系等方面进行深入研究, 以进一步推进植物多糖的发展和应用。

关键词: 植物多糖; 降解方法; 理化性质; 生物活性

中图分类号: TS210.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2023)03-0055-08

0 引言

植物多糖一般是指由十分子以上单糖通过不同类型糖苷键连接组成的复杂聚合物, 是植物生长发育过程中发挥重要作用的天然大分子^[1]。植物多糖分子结构复杂且支链分支度、长度不同, 在自然界中种类繁多。研究^[2-3]表明, 植物多糖具有很高的药用价值, 可在预防、控制和改善心血管疾病、肥胖症、糖尿病等慢性疾病中发挥着重要作用。植物多糖还具有增强机体免疫力、抗肿瘤、降血糖、抗衰老、抗病毒、调节肠道菌群等功能, 在生物医药、保健食品

品、药妆等领域均有较大的发展空间和良好的应用前景^[4]。但植物多糖分子质量大、聚合度高、结构复杂、黏度高且溶解性差, 难以穿越细胞膜进入生物体内发挥活性作用^[5-6], 所以通过适当方法把大分子植物多糖降解成一定分子质量的多糖片段以提高多糖的利用率, 对植物多糖的应用和发展具有重要意义^[7]。目前, 植物多糖的降解方法主要包括物理降解法、化学降解法、生物降解法及多种降解方法协同使用。本文拟对植物多糖的降解方法、降解产物的理化性质和生物活性进行综述, 以为植物多糖的深入研究和其在功能性食品中的应用提供参考。

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2022-03-02; 出版日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32201969, 32000281); 河南省青年科学基金项目(212300410297); 河南省高等学校重点科研项目计划支持项目(21A550014); 郑州轻工业大学博士科研启动基金项目(2020BSJJ015)

作者简介: 冀晓龙(1989—), 男, 山东省潍坊市人, 郑州轻工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为植物多糖结构与活性。E-mail: Xiaolongjiyu@163.com

通信作者: 刘延奇(1964—), 男, 河南省郑州市人, 郑州轻工业大学教授, 博士, 主要研究方向为淀粉及功能性食品。E-mail: 2007055@zzuli.edu.cn

1 植物多糖降解方法

1.1 物理降解法

1.1.1 超声波降解法 超声波是介质中的一种弹性机械波,频率一般超过 20 kHz,在传递过程中带有能量,能够使介质发生机械运动。在使用超声波降解植物多糖过程中,机械作用可使大分子多糖较敏感的化学键断裂,从而降低其分子质量、表面黏度,增加其水溶性,使其活性显著增强。研究^[6,8-9]发现,机械性断键作用和空化效应是超声波降解植物多糖的主要机理。超声波降解植物多糖不会破坏其结构和固有生物活性,只会通过随机剪切引起多糖的构象改变。D. Yuan 等^[10-11]利用超声波降解海藻螺旋体多糖发现,随着超声功率的增加,多糖的降解效果越好,多糖分子质量显著降低,且得到的是分子质量较小的均匀多糖。降解没有改变海藻螺旋体多糖的一级结构和单糖组成,但经过超声降解处理后,其分子间相互连接部分被破坏,形成了多孔的松散结构。Z. M. Dou 等^[12]利用超声波辐照黑莓果多糖发现,经过超声波辐照降解后,黑莓果多糖的分子质量和粒径显著下降,降解时间随着多糖分子链的缩短而增加。Y. Q. Xu 等^[13-14]利用超声波降解黑穗醋栗果实多糖发现,在 400 W 和 600 W 功率下,多糖分子质量分别降低了 42.02% 和 59.51%,粒径分别降低了 63.52% 和 68.85%,动态黏度分别降低了 27.88% 和 33.63%。降解前后单糖种类完全相同,但降解后多糖的表面积减少,失去了三维螺旋结构,表面呈片状,形态不规则。

超声波会优先降解分子质量较大的多糖,且存在一个限定降解过程的最小链长,在一定条件下,当达到该限定链长时,剪切力引起的降解会消失。利用超声波降解的这一特性,可实现植物多糖的可控性降解,且操作方便、绿色环保,但使用该方法较难获得分子质量更小的植物多糖。

1.1.2 微波降解法 微波是穿透性很强的电磁波,通过分子自身运动进行加热,具有快速加热、内部加热、节能环保等优点。使用微波降解植物多糖时,由于多糖分子中含有大量极性官能团(如羟基),分子的高速振荡及分子间的偶极作用会使糖苷键断裂,

进而使大分子多糖降解^[15]。微波降解多糖不仅存在热效应,还存在微波非热效应。梁瑞红等^[16-17]通过采用传统加热降解和微波加热降解果胶及壳聚糖发现,微波加热降解果胶过程中还存在非热效应。C. S. Zhou 等^[18]通过研究微波诱导 D-葡萄糖甘氨酸的美拉德反应及紫斑菌多糖降解发现,微波和水浴加热都没有引起美拉德反应产物的变化,从数据上未显示出非热效应。孙利芹等^[19]采用密闭式微波降解紫球藻胞外多糖,通过对比降解前后多糖的分子质量、黏度特性及溶解性,发现该多糖降解后易通过 0.22 μm 滤膜,且黏度降低、水溶性增大。任瑞等^[20]研究发现,在功率为 195 W、385 W 和 575 W 时,随着特性黏度的减小,降解速率也会减小;当功率达到 765 W 时,特性黏度与降解速率呈负相关。J. L. Wang 等^[21]利用微波降解沙蒿多糖发现,多糖平均分子质量明显降低,分子粒径也明显下降。

与传统热降解相比,微波降解速度更快、分子质量更小,这不仅是由于微波热效应,还有非热效应(如分子间振动产生的剪切作用等)的影响,但具体是哪种非热效应还需进一步探索。另外,微波降解还存在反应不充分、不易控制等缺点,尚需优化解决。

1.1.3 水热降解法 水热降解法是在密闭容器、高压高温条件下进行的反应,按照反应温度,可分为亚临界反应和超临界反应。随着反应稳定性和压力的升高、离子产物的变化及氢键的断裂,亚临界水和超临界水的性质会发生显著变化^[22]。姜美云等^[23]采用水热降解法降解果胶多糖发现,在最优工艺条件下,果胶多糖降解产物得率达 46.2%,3 种降解产物降解前后的糖基组成基本相似。P. S. Saravana 等^[22]采用水热降解法处理褐藻多糖发现,处理后多糖的分子质量由原来的 42.12 kDa 降至 0.85 kDa 以下,糖基组成基本没变化。T. Miyazawa 等^[24]通过水热降解法降解聚半乳糖醛酸发现,在温度高达 533 K 条件下,聚合度为 2~10 的低聚物产率为 22.1%,但降解产物会发生结构变形;在温度 493 K 条件下,有 90% 以上聚半乳糖醛酸被降解为低聚物。

在水热降解过程中,高温高压使部分糖基脱落,达到降解多糖的目的,随着反应条件的改变,降解程度也随之改变。利用水热降解法降解植物多糖,因

不使用化学有机酸,不会对环境造成污染,可用于工业化生产,但高温高压条件对设备要求较高,所以生产成本较高。

1.1.4 电离辐射降解法 电离辐射降解法是指在高能粒子(如 α 粒子、 β 粒子等)或光子(如 x 射线、 γ 射线等)辐照下,诱导水分子产生自由基并作用于糖苷键,使碳链发生断裂,进而导致植物多糖降解的方法^[25]。近年来,电离辐射降解法在降解半乳甘露聚糖^[26]、淀粉^[27]、纤维素^[28]等天然聚合物方面得到了广泛的应用。张卫东等^[28]研究了壳聚糖辐射降解产物的理化性质与辐照剂量之间的关系,发现10~450 kGy的辐照剂量可使降解产物的分子质量由 8.2×10^5 Da降至 1.0×10^3 Da左右,且在辐射剂量为47.75 kGy时降解效果最好。电离辐射降解法成本较低,产品品质高且不影响生物活性,但高剂量的电离辐射会破坏植物多糖的结构。

综上所述,采用超声波、微波、水热、电离辐射等物理降解法均能够降低植物多糖分子质量,不仅降解效率高、绿色环保、操作简单,而且超声波降解可实现植物多糖的可控性降解。但是,物理降解法存在降解不彻底、反应不充分、生产成本低、破坏植物多糖结构等问题。所以,在降解过程中应充分考虑各种方法的优缺点,选择合适的降解方法或对方法进行优化,以达到预期的降解目的。

1.2 化学降解法

1.2.1 酸降解法 酸降解法主要是在植物多糖中加入无机酸或有机酸,使植物多糖降解为小分子片段的方法。酸降解法的基本原理是植物多糖分子中的糖苷原子氧接受质子形成质子化苷键,削弱C—O键并使其发生断裂,形成碳阳离子中间体,最终生成不同聚合度、不同分子质量的多糖片段。研究^[29]发现,在相同条件下,使用无机酸比有机酸的降解速率更快、降解产物的分子质量更小、聚合度更低。酸降解法能够增加多糖的生物活性,高玉杰等^[30]利用三氟乙烯降解浒苔多糖发现,降解后多糖的平均相对分子质量减小了46.13%,黏度降低,水溶性提高。

酸降解法操作简单,但降解后多糖的分子质量分布较广,不能产生均一的多糖,且分离提纯较复

杂,对环境污染较大。

1.2.2 氧化降解法 氧化降解法主要是指植物多糖在强氧化剂(如 H_2O_2 、 Cl_2 、 ClO_2 等)的作用下氧化降解的方法^[31]。例如,王鑫纯等^[32]采用 H_2O_2 对野皂荚多糖进行氧化处理发现,降解后多糖的相对分子质量降低96.63%,且在体外代谢过程中表现出良好的降血糖、改善肠道菌群等作用。近年来,除加入强氧化剂外,裂解多糖单加氧酶在多糖氧化降解中得到了广泛应用,该酶利用活性中心的 Cu^{2+} 氧化降解多糖链的糖苷键,导致碳链断裂进而生成小分子多糖片段^[33-34]。采用裂解多糖单加氧酶降解纤维素可大大提高纤维素的利用率,且随着纤维素浓度的降低,降解效率逐渐增大^[35]。裂解多糖单加氧酶和强氧化剂都能攻击多糖链上的氢原子使糖苷键断裂,其中强氧化剂能直接作用于碳链或间接生成自由基导致碳链断裂,而裂解多糖单加氧酶能够选择性地作用于糖苷键的C1或C4位而导致糖苷键自发断裂。

1.2.3 自由基降解法 自由基降解法中的自由基主要包括羟自由基、超氧阴离子自由基、 H_2O_2 等,化学性质非常活泼。自由基降解植物多糖的作用机理是羟自由基攻击糖链夺取与C相连的氢原子进而生成羟烷基自由基,这些自由基不仅相互反应,而且与 O_2 反应生成过氧自由基,导致碳链断裂^[36]。C. F. Shao等^[37]研究羟自由基对纤维素的降解时发现,羟自由基可以从糖分子的羟基中夺取氢原子进而导致糖苷键断裂,促使植物多糖降解。相较于其他方法,自由基降解法降解后的植物多糖的分子质量分布均匀,但反应程度不易控制。

综上所述,化学降解法主要利用化学反应攻击植物多糖的碳链进而导致其断裂,以达到降解多糖的目的。相较于物理降解法,化学降解法简便易行、高效、生产成本低、对降解设备要求不高,但存在降解产物难以控制且不易分离、污染环境等不足。

1.3 生物降解法

生物降解法主要包括酶水解法和微生物发酵法,其中,酶水解法通过特定的水解酶(如果胶酶、纤维素酶、葡聚糖酶等)催化多糖分子内糖苷键断裂,进而降低多糖聚合度;而微生物发酵法主要是筛

选能够产生多糖降解酶的微生物,并利用产生的酶降解植物多糖^[38]。安丽萍等^[39]采用响应面法优化姬松茸多糖的降解工艺发现,当加酶量为2.9%、温度为59℃、反应时间为2.1h时,多糖降解得率最高。陈文等^[40]使用纤维素酶降解燕麦多糖发现,燕麦多糖降解后其分子质量和黏度降低、溶解性提高。秦丹丹^[41]使用纤维素酶对黑木耳多糖进行降解发现,加酶量对降解黑木耳多糖的影响最显著。

综上所述,相较于物理降解法和化学降解法,生物降解法具有反应条件温和、降解速率快和绿色环保的特点,克服了化学降解法所得产物分子质量分布不均一、物理降解法降解不彻底的缺点。但植物多糖结构复杂,筛选合适的微生物和酶是关键问题,且由于酶对环境敏感,所以反应条件须严格控制。

1.4 多种降解方法协同使用

为了提高植物多糖的降解效果,通常将两种或两种以上降解方法协同使用。比如,超声波辅助H₂O₂/酶降解法,微波辅助H₂O₂/水热降解法,微波辅助酶/酸降解法,自由基联合超声波降解法,等等。超声波辅助H₂O₂/酶降解法由于超声波的空化作用可增加植物多糖与H₂O₂/酶的接触机会,加速多糖分子链的断裂,进而加速降解反应的进程^[42]。黄海潮等^[43]通过比较H₂O₂法、超声波法、超声波辅助H₂O₂法降解坛紫菜多糖发现,采用不同处理方法得到的降解产物的DPPH清除率分别为30.05%、28.21%和48.56%,表明超声波辅助H₂O₂法降解程度高、产物活性强。J. J. Wang等^[44]对比酶法降解、超声降解和超声辅助酶法降解海参多糖发现,采用超声辅助酶法降解多糖的分子质量和粒径显著低于酶法降解和超声降解,且降解产物的DPPH自由基清除率、羟自由基清除率和还原力分别比酶法降解高38.1%、29.9%和29.3%,比超声降解高12.8%、14.6%和9.42%。

微波辅助H₂O₂、酶、酸及水热法降解植物多糖时,由于在微波的作用下可加速化学反应或酶的反应进程,因此在微波辅助其他方法降解多糖时能加快反应进程,并使降解程度更高。G. S. Li等^[45]采用微波辅助酸水解降解卡拉胶发现,在最佳反应条件(卡拉胶质量浓度5mg/mL、pH值3.0、温度

100℃、反应时间15min)下,得到聚合度为3~21的低聚糖,且与传统方法相比,此法更简单、高效和环保。郑宇^[46]采用微波协同H₂O₂降解黑木耳多糖发现,多糖的降解率达90.33%,且微波功率对结果影响最显著。

综上所述,采用多种降解方法协同使用能够弥补单一降解方法的不足,提高植物多糖降解效率,解决降解不完全等问题。但在降解过程中应充分考虑每一种方法的适用范围,以达到最佳的降解效果。

2 植物多糖降解产物的理化性质及生物活性

2.1 植物多糖降解产物的理化性质

降解是获得小分子低聚糖的重要方法,并对植物多糖理化性质(如特性黏度、分子质量、分散指数、多糖结构等)产生一定的影响。特性黏度是高分子聚合物溶液的浓度趋于零时的比浓黏度,由多糖分子间的氢键产生,其值不随多糖溶液浓度的变化而变化,在一定程度上与多糖的溶解性呈正相关。在植物多糖降解过程中,特性黏度是反应降解程度的一个重要指标,其随降解程度的增加而降低。分子质量包括重均分子质量(*M_w*)、数均分子质量(*M_n*)及黏均分子质量(*M_z*),其中*M_w*与*M_n*的比值称为分散指数,用来衡量分子质量分布的宽度。一般分子质量为100~200kD时,植物多糖的生物活性最高;相同来源的植物多糖,分子质量为5~10kD时不具有生物活性;分子质量在90kD以上的植物多糖基本都能形成三股螺旋结构,且均具有生物活性^[47]。植物多糖由多个糖基通过糖苷键连接而成,降解方法、作用位点的不同对多糖结构也会产生一定的影响。

物理降解法、化学降解法、生物降解法都可有效使大分子植物多糖的分子链断裂,达到降低多糖分子质量的目的。黄海潮等^[43]通过比较不同降解方法发现,利用超声波辅助H₂O₂降解植物多糖的效果较好,在降解2h后,分子质量从大于670kD降至235kD,相对黏度的变化与分子质量一致,均随着降解时间的延长而降低,但在2h后趋于平缓,说明在2h时多糖已降解完成。G. P. Gong等^[48]优化

H₂O₂-VC 降解紫菜多糖发现,当 H₂O₂ 与 VC 的质量比为 1 : 1 且降解 4 h 时,紫菜多糖的降解效率最大。D. Yuan 等^[10]采用超声波处理马尾藻多糖发现,经超声处理 5 h,马尾藻多糖的分子质量从 953 kD 降至 82 kD,表观黏度也降低,降解后多糖的分散指数下降,说明超声处理能得到分子质量均匀的多糖片段;且降解前后单糖组成及一级结构基本不变。

降解后的植物多糖,其分子质量、特征黏度、溶解性均显著下降,这可提高植物多糖的生物利用率,拓宽其在加工和生产中的应用;且降解过程并未改变植物多糖的基本结构,仅破坏其支链结构,使其暴露出更多活性基团,这有助于提高其生物活性。

2.2 植物多糖降解产物的生物活性

研究^[51]表明,降解后的植物多糖分子质量降低、水溶性更好,能够穿越细胞膜在细胞内发挥作用;且其表面疏松,暴露出更多活性基团,能够不同程度地提高植物多糖的生物活性(如抗氧化、抗肿瘤、抗炎、降血脂、降血糖等)。

2.2.1 抗氧化活性 植物多糖的抗氧化活性主要是能清除机体自由基,减轻自由基对机体组织的损伤和对生物分子的毒害作用,降低各种慢性疾病发生的机率。衡量植物多糖抗氧化活性的常用方法有清除羟自由基、超氧阴离子自由基和 DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)的能力;另外,植物多糖的各种还原力也是评价其抗氧化活性的指标^[52]。Z. S. Zhang 等^[49]采用羟自由基和超氧阴离子自由基评价山药多糖的抗氧化活性发现,降解后的山药多糖 LP3 的 *IC*₅₀ 分别为 55 g/mL 和 125 g/mL,自由基清除作用明显高于未降解的山药多糖。J. J. Mou 等^[50]采用 H₂O₂-VC 降解海参发现,获得的海参糖胺聚糖对 DPPH、超氧阴离子自由基和羟自由基的清除率分别为 54.1%、46.4% 和 61.3%,且均表现出浓度依赖性。J. W. Wu 等^[51]采用 H₂O₂ 等离子处理木耳多糖发现,分别降解 0 min、60 min、120 min 和 180 min 后,降解产物对 ABTS(2,2-联氮-(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐)自由基清除率分别为 17%、63%、66%、79%,表明降解产物对 ABTS 自由基有较强的清除能力;且随着处理时间的延长,降

解产物的相对分子质量越低,ABTS 自由基清除能力越强。经过降解后,植物多糖对 DPPH、O₂⁻、-OH 自由基的清除能力均强于原多糖,这可能是由于降解后植物多糖的分子质量降低、水溶性更好、表面结构较疏松、暴露出更多的活性基团。

2.2.2 抗肿瘤活性 经过降解后,植物多糖分子内氢键的断裂使其有更大的延伸空间,暴露出更多的活性位点,从而增强其抗肿瘤活性。据报道,降解后的硫酸多糖对 A549、HepG2 和 HeLa 细胞有较强的抑制作用,*IC*₅₀ 分别为 151.97 μg/mL、163.59 μg/mL 和 117.81 μg/mL;低分子质量硫酸多糖可通过诱导肿瘤细胞凋亡、周期停滞,达到抑制肿瘤细胞生长的目的^[21,53]。X. J. Yu 等^[54]采用超声降解条斑紫菜多糖发现,降解前后条斑紫菜多糖对肿瘤细胞 SGC7901 的抑制率分别为 12.86% 和 32.34%,即降解可以增强条斑紫菜多糖的抗肿瘤活性。

2.2.3 抗炎活性 Q. R. Zheng 等^[55]研究发现,相较于未处理的魔芋多糖,超声处理后的魔芋多糖具有更强的抑制 RAW 264.7 巨噬细胞 NO、TNF-α 和 IL-1β 的分泌水平,使 RAW 264.7 巨噬细胞具有更强的抗炎活性。B. Du 等^[56]采用响应面优化裂褶菌多糖的降解工艺发现,当多糖质量分数为 0.4%、超声时间为 9 min、超声功率为 600 W 时,降解产物对 NO 的抑制率为 95%,相较于未降解的裂褶菌多糖,降解能够提高其抗炎活性。

2.2.4 降血糖、降血脂活性 Z. Dou 等^[12]采用超声波降解黑莓多糖发现,降解后黑莓多糖对 α-葡萄糖苷酶具有较强的抑制作用,*IC*₅₀ 为 1.11 mg/mL,且抑制作用强于阿卡波糖(*IC*₅₀ 为 3.35 mg/mL),具有明显的降血糖活性。Y. Y. Qin 等^[52]采用 HCl 和 H₂O₂ 降解燕麦 β 葡聚糖发现,相较于未降解的 β 葡聚糖,降解产物 βG-H 和 βG-O 具有更强的生物活性,对脂肪过氧化具有较强的抑制作用,且具有很强的降血糖活性。P. Z. Yu 等^[57]采用微波降解孔石莼多糖发现,产物 U1、U2 对大鼠具有明显的降血脂活性,能够降低血清甘油三酯,提高血清高密度脂蛋白,且产物分子质量越小,效果越显著。

3 结论与展望

本文总结了植物多糖的降解方法,发现物理降

解法具有绿色环保、高效、操作简单等优点,但存在降解不彻底、反应不充分、生产成本高等问题;化学降解法具有简便易行、对降解设备要求低等优点,但存在降解产物不易分离、污染环境等不足;生物降解法具有反应条件温和、降解速率快、绿色环保、产物均一等优点,但存在降解成本高、对条件要求严格等不足;多种降解方法联合使用弥补了单一降解方法的不足,提高了植物多糖的降解效率。上述方法均能显著降低植物多糖的分子质量、特性黏度,不同程度地提高植物多糖的抗氧化、抗肿瘤、抗炎、降血糖、降血脂等生物活性。植物多糖的生物活性与多糖结构、糖链构象、分子质量等因素有关,虽然提高植物多糖生物活性的方法较多,但主要通过降解使多糖暴露出更多的活性位点以达到提高生物活性的目的、操作简单的降解方法依然是提高植物多糖生物活性的较好方法。植物多糖降解未来的发展主要集中在以下几个方面:1)对植物多糖定向降解的研究较少,亟需开发产物均一的定向降解方法;2)对降解产物结构与生物活性之间的关系尚处于推测阶段,需对降解产物高级结构与生物活性的构效关系展开深入研究;3)复杂多糖的降解机理尚不清楚,且由于其结构的复杂性和多样性,其降解机理也不同,未来需探讨其在特定条件下的降解机制;4)开发具有特定功能活性的植物多糖精深加工产品。

参考文献:

- [1] KAKAR M U, NAVEED M, SAEED M, et al. A review on structure, extraction, and biological activities of polysaccharides isolated from *Cyclocarya paliurus* (Batalin) Iljinskaja[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 420–429.
- [2] 李艳, 宁厚齐, 李迎秋. 海藻渣中岩藻聚糖硫酸酯提取工艺优化[J]. 轻工学报, 2020, 35(6): 9–15.
- [3] 冀晓龙, 尹明松, 侯春彦, 等. 红枣多糖提取、分离纯化及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 346–353, 358.
- [4] XU S Y, HUANG X S, CHEONG K L. Recent advances in marine algae polysaccharides: Isolation, structure, and activities[J]. Marine Drugs, 2017, 15(12): 388.
- [5] 韩莎莎, 黄臻颖, 沈照鹏, 等. 酶法降解坛紫菜多糖及其产物分析[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 145–149.
- [6] 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.
- [7] 张海芸, 贺亮, 李琴, 等. 降解对植物多糖理化性质以及生物活性影响的研究[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(3): 15–19.
- [8] 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.
- [9] LI R S, FEKE D L. Rheological and kinetic study of the ultrasonic degradation of locust bean gum in aqueous saline and salt-free solutions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 334–338.
- [10] 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.
- [11] 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: 251–297.
- [12] DOU Z M, CHEN C, FU X. The effect of ultrasound irradiation on the physicochemical properties and α -glucosidase inhibitory effect of blackberry fruit polysaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 568–576.
- [13] XU Y Q, GUO Y Y, DUAN S Y, et al. Effects of ultrasound irradiation on the characterization and bioactivities of the polysaccharide from blackcurrant fruits [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 206–214.
- [14] 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.
- [15] 来水利, 潘志友, 李晓峰. 微波辐射下壳聚糖降解性能的研究[J]. 陕西科技大学学报, 2005(1): 38–40.
- [16] 梁瑞红, 王淑洁, 贺小红, 等. 微波降解果胶对其流变性质的影响及动力学[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 1–6.
- [17] WASIKIEWICZ J M, YEATES S G. “Green” molecular weight degradation of chitosan using microwave irradiation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(4): 863–867.
- [18] ZHOU C S, YU X J, MA H L, et al. Examining of athermal effects in microwave-induced glucose/glycine reaction and degradation of polysaccharide from *Porphyra yezoensis* [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(1): 38–44.
- [19] 石全见, 孙利芹, 周妍, 等. 紫球藻胞外多糖抗氧化和免疫调节活性的研究[J]. 海洋通报, 2009, 28(5): 85–90.
- [20] 任瑞, 马海乐, 朱春梅, 等. 香菇多糖微波降解反应动力学研究[J]. 化学工程, 2009, 37(4): 38–40.

- [21] WANG J L, YANG X P, BAO A J, et al. Microwave-assisted synthesis, structure and anti-tumor activity of selenized *Artemisia sphaerocephala* polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 1108–1118.
- [22] SARAVALA P S, CHO Y N, PATIL M P, et al. Hydrothermal degradation of seaweed polysaccharide: Characterization and biological activities [J]. Food Chemistry, 2018, 268: 179–187.
- [23] 姜美云, 唐硕, 王婷, 等. 果胶多糖水热法降解及其产物体外抗氧化性评价 [J]. 食品科学, 2019, 40(12): 253–259.
- [24] MIYAZAWA T, FUNAZUKURI T. Hydrothermal production of mono (galacturonic acid) and the oligomers from poly(galacturonic acid) with water under pressures [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 42(10): 2310–2314.
- [25] 曹毅, 谢文. 电离辐射的生物效应及健康影响 [J]. 科技导报, 2018, 36(15): 48–53.
- [26] NEMTANU M R, BRASOVEANU M. Degradation of amylose by ionizing radiation processing [J]. Starch-Starke, 2017, 69(3/4): 1600027.
- [27] WACH R A, ROKITA B, BARTOSZEK N, et al. Hydroxyl radical-induced crosslinking and radiation-initiated hydrogel formation in dilute aqueous solutions of carboxymethylcellulose [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 112: 412–415.
- [28] 张卫东, 李正魁, 朱佳廷, 等. 壳聚糖电离辐射降解的研究 [J]. 核农学报, 2005(1): 55–57.
- [29] 邓培昌, 胡杰珍, 侯庆华, 等. 壳寡糖制备方法研究进展 [J]. 广州化工, 2012, 40(6): 22–24, 43.
- [30] 高玉杰, 吕海涛. 酸法降解浒苔多糖及其清除羟自由基活性研究 [J]. 食品科学, 2013, 34(16): 62–66.
- [31] VARELA O. Oxidative reactions and degradations of sugars and polysaccharides [J]. Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry, 2003, 58: 307–369.
- [32] 王鑫纯, 徐伟, 蒋建新, 等. 野皂荚多糖氧化降解产物的体外代谢过程研究 [J]. 林产化学与工业, 2020, 40(3): 99–107.
- [33] LABOUREL A, FRANSEN K E H, ZHANG F, et al. A fungal family of lytic polysaccharide monoxygenase-like copper proteins [J]. Nature Chemical Biology, 2020, 16(3): 345–350.
- [34] HANGASKY J A, DETOMASI T C, MARLETTA M A, et al. Glycosidic bond hydroxylation by polysaccharide monoxygenases [J]. Trends in Chemistry, 2019, 1(2): 198–209.
- [35] GARAJOVA S, MATHIEU Y, BECCIA M R, et al. Single-domain flavoenzymes trigger lytic polysaccharide monoxygenases for oxidative degradation of cellulose [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28276.
- [36] 岳真, 李守玲, 李玺, 等. 羟自由基降解海带硫酸多糖的可行性研究 [J]. 时珍国医国药, 2009, 20(6): 1459–1460.
- [37] SHAO C F, SHAO Q, WANG X Y, et al. Study on cellulose degradation induced by hydroxyl radical with cellobiose as a model using GC-MS, ReaxFF simulation and DFT computation [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 233: 115677.
- [38] RODRIGUEZ-JASSO R M, MUSSATTO S I, PASTRANA L, et al. Fucoidan-degrading fungal strains: Screening, morphometric evaluation, and influence of medium composition [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 162(8): 2177–2188.
- [39] 安丽萍, 段懿涵, 盛瑜, 等. 姬松茸多糖酶降解对 D-半乳糖诱导 3T3 细胞氧化损伤的保护作用 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 653–658.
- [40] 陈文, 王楠, 张民. 燕麦多糖的纤维素酶降解及理化性质分析 [J]. 中国食品添加剂试验研究, 2014(2): 159–163.
- [41] 秦丹丹. 黑木耳多糖的酶法降解、抗氧化活性及应用研究 [D]. 长春: 长春大学, 2020.
- [42] 万真真, 高文宏, 曾新安. 超声波协同过氧化氢氧化法制备低分子质量大豆多糖 [J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(10): 81–85.
- [43] 黄海潮, 王锦旭, 潘创, 等. 超声波辅助过氧化氢法降解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.
- [44] WANG J J, SHI S, LI F F, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides obtained from sea cucumber gonads via ultrasound-assisted enzymatic techniques [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113307.
- [45] LI G S, ZHAO X, LYU Y J, et al. Preparation of κ -carrageenans with microwave assisted acid hydrolysis method [J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(2): 345–349.
- [46] 郑宇. 微波与 H_2O_2 协同降解黑木耳多糖及其产物抗氧化活性、流变性质研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [47] 苏钰琦. 苹果多糖的分离纯化与抗氧化活性深入研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [48] GONG G P, ZHAO J X, WEI M, et al. Structural characterization and antioxidant activities of the degradation products from *Porphyra haitanensis* polysaccharides [J]. Process Biochemistry, 2018, 74: 185–193.
- [49] ZHANG Z S, WANG X M, LIU C B, et al. The degradation, antioxidant and antimutagenic activity of the mucilage polysaccharide from *Dioscorea opposita* [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 150: 227–231.
- [50] MOU J J, WANG C, LI Q, et al. Preparation and antioxidant properties of low molecular holothurian glycosamin-

- oglycans by H₂O₂/ascorbic acid degradation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 1339–1347.
- [51] WU J W, LI P, TAO D B, et al. Effect of solution plasma process with hydrogen peroxide on the degradation and antioxidant activity of polysaccharide from *Auricularia auricula*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 117: 1299–1304.
- [52] QIN Y Y, XIE J, XUE B, et al. Effect of acid and oxidative degradation on the structural, rheological, and physiological properties of oat β -glucan[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106284.
- [53] WANG J L, BAO A J, MENG X H, et al. An efficient approach to prepare sulfated polysaccharide and evaluation of anti-tumor activities in vitro[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 184: 366–375.
- [54] YU X J, ZHOU C, YANG H, et al. Effect of ultrasonic treatment on the degradation and inhibition cancer cell lines of polysaccharides from *Porphyra yezoensis*[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 650–656.
- [55] ZHENG Q R, LI W, LIANG S, et al. Effects of ultrasonic treatment on the molecular weight and anti-inflammatory activity of oxidized konjac glucomannan[J]. CyTA-Journal of Food, 2019, 17(1): 1–10.
- [56] DU B, ZENG H S, YANG Y D, et al. Anti-inflammatory activity of polysaccharide from *Schizophyllum commune* as affected by ultrasonication[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 100–105.
- [57] YU P Z, LI N, LIU X G, et al. Antihyperlipidemic effects of different molecular weight sulfated polysaccharides from *Ulva pertusa* (Chlorophyta) [J]. Pharmacological Research, 2003, 48(6): 543–549.

Research progress on degradation methods and product properties of plant polysaccharides

JI Xiaolong^{1,2,3}, GUO Jianhang¹, TIAN Jingyuan¹, MA Ke¹, LIU Yanqi^{1,2,3}

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Based on the necessity of plant polysaccharide degradation, the degradation methods of plant polysaccharides and the physicochemical properties and biological activities of the degradation products were reviewed as follows. The chemical degradation method was simple and easy to implement, and had low requirements for degradation equipment, but there were problems such as difficult separation of degradation products and environmental pollution; the biodegradation method had mild reaction conditions, fast degradation rate and uniform products, but there were high degradation costs, strict requirements for conditions; the synergistic use of multiple degradation methods could make up for the shortcomings of a single degradation method and improved the degradation efficiency of plant polysaccharides; degradation could significantly reduce the molecular weight and intrinsic viscosity of plant polysaccharides, and improved the antioxidant and anti-tumor properties, anti-inflammatory, hypoglycemic, hypolipidemic and other biological activities of plant polysaccharides. In the future, in-depth research can be carried out in the development of simple and environmentally friendly, directional degradation, and uniform degradation methods, and the structure-activity relationship between the advanced structure of degradation products and biological activity, so as to further promote the development and application of plant polysaccharides.

Key words: plant polysaccharides; degradation method; physicochemical property; biological activity

(责任编辑:杨晓娟)