

泥鳅多糖的研究进展

韩淙琳¹, 刘珈铭¹, 李茜^{1,2*}, 张民^{1,2,3*}

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300392; 2. 天农农产品加工中外联合研究中心, 天津 300392; 3. 天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457)

摘要: 近年来随着泥鳅养殖及产业化的快速发展, 泥鳅资源的开发和高值化利用已成为研究热点。泥鳅是一种含有丰富优质蛋白、脂肪酸以及微量元素的营养健康食品, 具备多种保健功能和药用价值, 其中泥鳅多糖是从泥鳅中提取得到的一种游离中性多糖, 具有耐缺氧、抗肿瘤、抗氧化、调节免疫、降血糖、抗炎等功能。本文主要综述了泥鳅多糖的制备方法、分离提纯方法、结构表征、生物活性、精深加工等方面的研究进展, 旨在为泥鳅多糖的高值化利用提供一些理论基础, 为泥鳅产业链的快速发展提供新的方向。

关键词: 泥鳅多糖; 分离纯化; 生物活性; 精深加工

Research progress of *Misgurnus anguillicaudatus* polysaccharide

HAN Cong-Lin¹, LIU Jia-Ming¹, LI Qian^{1,2*}, ZHANG Min^{1,2,3*}

(1. College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. China-Russia Agricultural Products Processing Joint Laboratory, Tianjin 300392, China; 3. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: In recent years, with the rapidly development of *Misgurnus anguillicaudatus* breeding and industrialization, the development and high-value research of *Misgurnus anguillicaudatus* resources has become a hot spot. *Misgurnus anguillicaudatus* is a kind of nutritious and healthy food rich in high quality protein, fatty acids and trace elements, and has a variety of health function and medicinal value. The *Misgurnus anguillicaudatus* polysaccharide is a kind of free neutral polysaccharide extracted from *Misgurnus anguillicaudatus*, which plays an important role in anti-hypoxia, anti-tumor, anti-oxidation, immune regulation, hypoglycemi and anti-inflammatory. This paper summarized the preparation methods, separation and purification method, structure characterization, biological activity research, and the development of deep processing products of *Misgurnus anguillicaudatus* polysaccharide, in order to provide theoretical basis for the high-value utilization of *Misgurnus anguillicaudatus* polysaccharide, and provide new prospects and directions for promoting the healthy development of *Misgurnus anguillicaudatus* industry.

KEY WORDS: *Misgurnus anguillicaudatus* polysaccharide; separation and purification; bioactivity; deep

基金项目: 国家万人计划项目(18PTZWHZ00080)、天津市自然科学基金项目(18JCZDJC34200)

Fund: Supported by the Project of National Ten Thousand People Program of China (18PTZWHZ00080), and the Natural Science Foundation of Tianjin (18JCZDJC34200)

*通信作者: 李茜, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: limengqia@163.com

张民, 博士, 教授, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: zm0102@tust.edu.cn

*Corresponding author: LI Qian, Ph.D, Lecturer, College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China. E-mail: limengqia@163.com

ZHANG Min, Ph.D, Professor, State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, No.29, 13 Street, TEDA Economic and Technological Development Zone, Tianjin 300457, China. E-mail: zm0102@tust.edu.cn

processing

0 引言

泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)系鳅科泥鳅属动物,又名鳅、鳅鱼,属于小型淡水鱼类,食性杂、生长快、繁育周期短、适应性强^[1],适宜养殖,广泛分布于中国、日本、韩国以及俄罗斯等地^[2]。泥鳅营养价值较高,高蛋白低脂肪,肉或全体入药,有补中气、祛湿邪的效果,属于药食同源,具有重要的生理保健作用,被誉为“水中人参”。随着人们生活水平的提高、对营养健康食品认识的深入及追求的提高,泥鳅作为优质功能食品的来源之一,在国内外消费需求不断增大。

国内泥鳅主要用作活体销售,直接提供给个人或餐厅烹调食用,对泥鳅生物活性成分的开发利用、精深加工、产品开发、高值化利用等方面的研究较少^[3],极大限制了泥鳅资源的经济价值,泥鳅高值化利用产业亟待完善^[4]。

泥鳅的生物活性成分有多糖、凝集素、抗菌肽等,目前对泥鳅活性成分的研究主要是关于多糖、抗菌肽等方面。天然多糖是一类具有高分子碳水化合物结构和生理功能的无毒大分子^[5],其结构多样,生物活性较高^[6],成为人们关注的热点。相关研究显示,泥鳅多糖可以抗肿瘤、抗氧化、调节免疫、抗炎、降血糖等,因而成为泥鳅生物活性因子的研究重点。本文阐述了泥鳅多糖的制备方法、分离纯化、结构表征、生物活性、精深加工等内容,以期为提高泥鳅的开发利用和多糖产品的研究与开发提供理论借鉴。

1 泥鳅多糖的制备方法

活性物质的提取,主要由活性物质的溶解性决定,多糖是由不同或相同的单糖通过糖苷键相互连接而成的天然极性大分子^[7],依据相似相溶原理,糖类物质的特点是极易溶于水,可直接用酸、碱溶液进行提取。动物源多糖以糖链作为基本骨架,常与蛋白质、脂质等结合形成多糖复合体,这种结构特性赋予了动物多糖以不同的生物活性,但是对其提取、纯化、结构鉴定、作用机制等研究带来极大困难,因此需考虑除去蛋白质的同时不破坏多糖的活性^[8]。天然产物的提取经过以下4个阶段:(1)溶剂渗入固体基质;(2)溶质溶解在溶剂中;(3)溶质扩散出固体基质;(4)提取的溶质被收集。在4个阶段中,任何提高扩散率和溶解度的因素均有助于提取其活性物质,其中溶剂的性质、物料的粒度、固液比、提取温度和时间均会影响提取率^[9]。泥鳅多糖的制备方法包括:水溶液提取法、碱液提取法、酶辅助法、超声辅助法等。

1.1 水提法

多糖中极性基团较多,因此与水分子有一定的亲和力。分子量较小、支链较少的多糖较易溶于水,且溶解度随温度升高而增大。但是,多糖分子量越大,疏水性越强,对一些分子量较大、支链多的多糖需要添加酸、碱辅助或利用有机溶剂才能将多糖浸提出来^[10]。水提法的优点在于操作简单、生产成本低,其缺点是效率较低、杂质较多、能耗较大,此外由于提取过程中的高温,其天然生物活性成分也可能发生热降解^[11]。早期动物多糖的提取也多采用水提法,水提法适合于透明质酸等不含硫酸基多糖的提取,近年来,动物多糖大多采用碱提法或者酶提法,因为有关研究显示水提法制备泥鳅多糖得率较低^[12]。

1.2 碱提法

泥鳅多糖是一种动物多糖,常采用碱提法。碱提法是基于动物多糖中的蛋白质和多糖间的共价键在碱性溶液中的不稳定性,在碱性条件下容易断裂的特点,利用稀碱溶液将糖肽键断裂而游离出多糖的过程^[13]。一般采用低浓度的氢氧化钠溶液进行提取,反复浸提多次,可提高多糖得率。碱提取多糖条件温和、操作简单、得到的粗多糖中蛋白质含量较少,在实际应用中较为广泛,可用于含糖醛酸的多糖和部分酸性多糖的提取,但需要注意控制碱液浓度、提取时间等关键条件。

梯度浓度的 NaOH 溶液对泥鳅多糖得率的影响规律研究显示,用 0.1 mol/L NaOH 溶液提取泥鳅多糖得率可达 2.24%,相较于水提法得率显著提高,在一定浓度范围内泥鳅多糖得率随 NaOH 浓度的升高而增大,当 NaOH 浓度为 0.3 mol/L 时泥鳅多糖得率最高为 2.32%,当 NaOH 浓度继续增加时,多糖得率呈下降趋势^[12]。

1.3 酶辅助法

酶辅助法是在水浸提过程中添加一定量的蛋白酶辅助,以提高多糖提取率。酶辅助法提取多糖的原理是:酶可以有选择性地水解动植物细胞细胞膜,减少溶剂提取时来自细胞膜和细胞间质的阻力,使有效成分得到释放,同时酶的使用也可以将多糖降解为更小分子量的片段,从而更有利于多糖从细胞内释放出来。酶法特异性强、反应速度快、提取效率高、条件温和、安全性好、成本低^[14]。除此之外,通过优化某些物理化学参数,如反应时间、pH 值、温度,以及通过选择合适的酶或它们的混合物,可以最大限度地提高多糖提取率^[15]。但是该技术有一定局限性,为使酶活尽可能大,须严格控制酶反应温度、pH 值等,温度、pH 值的微小变化或酶抑制剂的存在都可能导致酶活下降,从而降低提取效率^[16]。

党晓妍^[17]分别比较了木瓜蛋白酶、动物蛋白酶、中性蛋白酶、菠萝酶、风味酶对泥鳅多糖得率的影响, 结果显示, 添加 5% 的中性蛋白酶在 50 °C 条件下酶解 6 h, 泥鳅多糖得率最高为 5.37%。

1.4 超声辅助法

超声辅助法是在用水溶液提取时添加超声波辅助, 是建立在物理破碎的基础上, 通过超声波的机械效应、空化效应、热效应破坏细胞膜^[10], 增加溶剂的渗透能力, 加速多糖组分融入溶剂中, 不仅缩短了提取时间, 增加了原料的利用率和有效成分的得率, 而且减少了溶剂的使用量, 避免高温对有效成分的影响^[18]。但需要严格控制超声提取的时间, 超声作用时间过长会造成得率下降, 可能是由于超声波作用时间太长, 导致多糖的结构改变, 糖苷键断裂, 使得多糖的得率下降^[19]。

党晓妍^[17]优化了泥鳅多糖超声辅助提取工艺, 研究结果显示, 在料液比 1:20 (g/mL)、超声时间 20 min、超声功率 100 W 的条件下, 多糖得率最高为 2.79%。

2 分离提纯方法

粗提的泥鳅多糖纯度较低, 需要将蛋白质及其他小分子物质去除后才能制得纯度较高的多糖。泥鳅多糖纯化的常用方法有 Sevage 法、酶解法、层析技术等。

2.1 Sevage 法

Sevage 法是最常用的除蛋白技术之一, 其原理是蛋白质与氯仿-正丁醇溶液生成不溶性凝胶物质^[20], 将氯仿和正丁醇以一定比例配制成 Sevage 试剂并加入到多糖溶液中, 剧烈振荡 20~30 min 使蛋白质变性^[21], 通过离心除去变性蛋白质。该方法条件温和、适用性广, 但是需要多次操作才能达到理想效果, 多糖损失率较高。

利用 Sevage 法对泥鳅粗多糖进行纯化^[22], 利用紫外光谱扫描进行纯度鉴定, 结果显示, 纯化后的泥鳅多糖在 199 nm 处出现多糖的特征吸收峰, 在 260 nm 处仍存在小吸收峰, 说明仍存在蛋白质或核酸等杂质成分, 仅依靠 Sevage 法无法得到泥鳅多糖纯品, 需通过其他方式进一步纯化。

2.2 酶解法

蛋白质除游离蛋白质外, 还会和多糖结合形成糖蛋白, 而糖蛋白用 Sevage 法难以完全去除^[23]。酶解法是根据蛋白酶的酶解作用将糖蛋白中的蛋白质和多糖分离, 从而脱除蛋白质。蛋白质的种类多, 为有效去除蛋白质, 通常选用专一性较低的蛋白酶^[24], 例如木瓜蛋白酶、胃蛋白酶等。

用碱液浸提的粗多糖经过碱性蛋白酶处理, 用 Sevage 法除蛋白, 用葡聚糖凝胶色谱柱进行纯化, 再进行

紫外全波段扫描, 结果显示纯化后的多糖溶液在 260 nm 以及 280 nm 处均无吸收峰, 说明多糖中无蛋白质、核酸等杂质, 多糖组分较均一^[12]。

2.3 层析技术

离子交换层析目前主要使用的是二乙氨基乙基 (diethylaminoethyl, DEAE) 纤维素离子交换柱层析, 是一种离子交换树脂^[25], 其原理是利用多糖不同组分极性不同, 带电荷数不同, 与树脂的吸附性不同, 利用不同浓度的流动相分离不同组分, 不同组分会根据其离子交换树脂的亲疏性先后洗脱出来^[26]。

凝胶过滤层析主要起分子筛的作用, 利用梯度浓度的盐溶液或者缓冲溶液作洗脱剂, 梯度洗脱, 使不同分子量的多糖得以分离^[27]。在洗脱过程中, 小分子物质因进入凝胶网孔而流出较慢, 大分子物质则直接通过凝胶粒子间隙流出, 速度较快, 所以分子量较大的多糖先从柱中流出, 分子量小的多糖后流出。该方法条件温和、回收率较高、分离分子量范围较广^[28]。

钦传光等^[29]提取到的泥鳅粗多糖经 Sephadex G-100 凝胶层析柱纯化后, 利用高效液相色谱进行纯度鉴定, 色谱图上只出现单一峰, 说明多糖分离纯化效果较好。

3 结构表征

多糖的理化性质及生理功能与其结构密切相关, 因此有必要对泥鳅多糖进行结构表征, 为研究其构效关系奠定基础, 泥鳅多糖的结构表征是依据天然多糖的结构表征方式进行的。

天然多糖按照来源不同可以简单分为 4 类: 植物多糖、海藻多糖、动物多糖和微生物多糖^[30], 根据其电荷性质又可分为: 中性多糖(如纤维素、淀粉、果胶等)、阳离子多糖(如几丁质、壳聚糖等)、阴离子多糖(如海藻酸钠、透明质酸等)^[31], 每个类别都有其特定的结构特征, 多糖的分子结构为理解多糖的功能、构象和生理特性提供了基础。多糖的结构十分复杂, 首先组成多糖的单糖种类多样^[32], 其次即使单糖组成相同, 因为其糖链的连接方式、有无支链等, 都会造成多糖结构或者功能的不同^[33]。多糖微观结构不均一, 而且分子量发散, 使得完全准确的多糖结构式成为难题。因此通常采用化学分析、仪器技术和生物方法相结合的方法全面了解多糖的结构并利用其功能^[34]。多糖的结构表征包括多糖含量、分子量、单糖组成及比例、糖苷键类型、连接方式等^[35]。

分析多糖结构的手段包括物理方法, 如高效液相色谱法进行分子量的测定、气相色谱法分析单糖组成、傅里叶变换红外光谱鉴定其官能团^[36]、核磁共振分析糖苷键的连接方式、糖环构象等^[37], 也可以采用化学分析法, 如高碘酸氧化、Smith 降解、甲基化判断糖苷键位置和类型、

刚果红实验验证多糖的空间结构等,除此之外,还可以采用酶降解、免疫化学法等。但现在还没有一种方法可独立完成多糖的结构分析,需联合使用多种方法^[22]。

3.1 高碘酸氧化法、Smith 降解法、甲基化反应

高碘酸氧化法可根据消耗高碘酸的量以及释放甲酸的量来推测多糖中糖苷键的种类以及比例。Smith 降解法是将高碘酸氧化后的物质还原,然后进行酸水解,通过气相色谱或者高效液相色谱鉴别,进而判断出糖苷键的键型及位置等信息。甲基化分析法是基于用甲基亚砷基碳负离子和甲基碘化物处理碳水化合物,从而使甲基化多糖完全水解成为部分甲基化单糖和羟基乙酰化的原理^[38],用甲基化试剂将单糖的游离残基全部甲基化,还原和乙酰化反应后使用气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)检测,从而推测出单糖的连接方式、位置、比例及支链连接位点等信息^[39]。

3.2 高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)

高效液相色谱法是一种具有广泛用途和分析能力的色谱技术,可以被应用于多糖分子量的测定及纯度鉴定^[40]。高效液相色谱法是根据不同组分对固定相和流动相吸附或分配系数的差异从而分离鉴定的办法。在液相色谱中的主要分离过程是:吸附、分配、离子交换、体积排阻、亲和力和^[41]。可与 HPLC 串联的检测器有蒸发光散射器(evaporative light scattering detector, ELSD)、示差折光检测器、紫外检测器、荧光检测器、四极杆质谱检测器等。

通过凝胶色谱柱经高效液相色谱分析对泥鳅多糖进行分离鉴定时,根据其出峰时间进行定性可知,泥鳅多糖由一个分子量为 1.30×10^5 Da 的高聚糖和一个分子量为 1.54×10^3 Da 的寡糖构成;根据其峰面积定量可知,高聚糖及寡糖的相对含量分别为 19.1%和 80.9%^[29]。

3.3 气相色谱法

气相色谱法根据各物质的沸点、极性和吸附能力的不同分离混合物,可以用于多糖单糖组成分析,通过保留时间定性,峰面积定量^[42],具有高分辨率、高灵敏度、样品用量少等优点^[43]。气相色谱法适用于低沸点、易挥发、热稳定性差的样品的分析,但是多糖沸点较高,不能直接进行气相色谱法检测,需经过柱前衍生使其转化为易气化物质。

对泥鳅多糖进行气相色谱法分析,结果显示,泥鳅多糖主要由岩藻糖、半乳糖和甘露糖构成^[44]。

3.4 傅里叶变换红外光谱法

红外光谱法可用于识别多糖存在的官能团及各类吡喃糖糖苷键的构型,其原理是糖类中一些特殊的官能团呈现特异的红外吸收,具有分析速度快、样品制备简便、较

高的准确性和稳定性的优点^[45],然而也存在缺点,多次背景扫描和样品扫描是必要的,以避免由于周围环境条件而导致光谱中的伪影和变化^[46]。目前一般使用波数为 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 的波段对样品进行扫描^[47]。

泥鳅多糖在 $4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 波段的红外光谱扫描结果显示, 3400 cm^{-1} 处有强吸收峰,表示有 O-H 键及 N-H 键的伸缩振动,说明存在 -OH 官能团及 -NH₂ 官能团;在 2927 cm^{-1} 处存在吸收峰,表明有 C-H 键伸缩振动,说明可能存在 -CH₃ 官能团;在 890 cm^{-1} 处有特征吸收峰,这是 β 型吡喃糖的特征吸收峰,说明泥鳅多糖为 β 型吡喃糖^[22]。

3.5 核磁共振波谱法(nuclear magnetic resonance, NMR)

核磁共振光谱可以检测到许多原子核,但主要是确定碳-氢骨架^[48],可以检测多糖糖苷键构型以及重复结构中单糖数目,其原理是利用磁场检测分子中原子核性质及其与周围环境的作用而进行结构分析。核磁共振技术的优点是其不会损坏多糖样品。¹H-NMR 主要检测多糖的糖苷键构型,¹³C-NMR 可以分辨不同碳核和分子的构型构象,²D-NMR 对多糖碳氢连接方式进行确认^[49]。

对泥鳅多糖进行核磁分析,¹H-NMR 结果显示,质子在 5.415 ppm 处有位移,对应 α 型吡喃糖,其余质子位移均小于 5.0 ppm,对应 β 型吡喃糖,即泥鳅多糖中同时存在 α 型吡喃糖和 β 型吡喃糖;在 ¹³C-NMR 谱图中出现了 β 型糖苷异头碳特征峰,且在 160~180 ppm 处未见信号,表明泥鳅多糖中不含糖醛酸^[12]。

3.6 刚果红实验

通过刚果红实验可以检验多糖的空间结构是否包含三股螺旋结构。其原理是刚果红染料可以和含三股螺旋结构的多糖结合形成复合物,当处在一定 NaOH 浓度下其最大吸收波长会发生红移^[50]。因此可以根据最大吸收波长的变化,检验多糖是否含有三股螺旋结构。

采用刚果红实验对泥鳅多糖空间结构进行分析结果显示,泥鳅多糖-刚果红络合物的最大吸收波长随氢氧化钠浓度升高而下降,表明泥鳅多糖中存在三股螺旋结构且随氢氧化钠浓度升高逐渐解旋为单股螺旋^[12]。

4 生物活性

4.1 耐缺氧

低氧对机体是一种不良性刺激,影响机体的氧化功能,严重者可使机体因心脑血管等重要器官供氧功能障碍导致死亡^[51]。周军等^[52]连续 14 d 分别用 25、50、100 mg/kg 剂量的泥鳅多糖给小鼠灌胃后进行耐缺氧实验,实验结果显示,不同剂量的泥鳅多糖均可增加小鼠亚硝酸钠中毒存活的时间,中、高剂量组与对照组相比有显著性差异,低剂

量组无显著性差异, 说明泥鳅多糖只有达到一定剂量才可显著延长小鼠存活时间; 研究发现, 25、50、100 mg/kg 剂量的泥鳅多糖还可分别使小鼠血红蛋白含量由 165.4 g/L 上升至 170.1、178.4、173.2 g/L, 推断小鼠耐缺氧的原因可能是多糖可以提高血液携氧能力, 中等剂量浓度多糖效果较好。李金华等^[53]研究发现泥鳅粉可以提高小鼠急性脑缺血性缺氧能力, 与对照组相比, 200 mg/kg 泥鳅多糖可使小鼠存活时间由 15.2 min 延长至 18.1 min^[54]。由以上实验可说明泥鳅多糖具有提高机体耐缺氧能力的功能, 且与浓度呈一定剂量关系。

4.2 抗肿瘤

正常情况下, 人体细胞自主有序的进行分裂、分化、衰老、凋亡的过程。当细胞基因突变或者染色体受损时, 细胞可能发生癌变成为肿瘤细胞, 异常增殖、侵袭及转移, 而多糖可以抑制或延缓该过程^[55]。多糖主要从 2 个方面发挥抗肿瘤效果, 一是通过增强机体免疫力, 可以有效遏制恶性肿瘤细胞的生长并杀死肿瘤细胞; 二是诱导肿瘤细胞分化或者凋亡, 干扰破坏机体原癌基因表达, 从根本上控制肿瘤细胞的生成。ZHANG 等^[56]的研究表明, 400 mg/L 质量浓度的泥鳅多糖可以引起细胞内 Ca^{2+} 浓度的持续升高, 共同培养的前 3 d, 细胞内浓度急剧升高, 后一直维持在较高水平, 由此推断, 泥鳅多糖的抗肿瘤的机制是多糖诱导肿瘤细胞的凋亡, 其过程可能是多糖诱导线粒体活性氧的升高, 活性氧介导细胞内 Ca^{2+} 库中的 Ca^{2+} 的释放, 使得线粒体跨膜电位下降, 细胞凋亡程序启动。

4.3 抗氧化

活性氧类, 例如羟基自由基、超氧阴离子和过氧化氢, 在机体需氧代谢过程中不断产生^[57]。人体在正常氧化代谢过程中不断生成活性氧自由基, 它们独立存在, 含有一至多个不成对电子或分子^[58]。过量的氧自由基强烈的氧化应激表现在脂质过氧化、DNA 损伤和蛋白质变性、细胞和组织损伤、加速衰老等方面^[59], 从而导致多种疾病, 包括糖尿病、心血管疾病和神经系统疾病^[60]。为防止此类现象发生, 就需要提高人体内的防御机制, 抗氧化损伤活性因子就是一种很好的选择。抗氧化损伤活性因子发挥抗氧化作用的机制为: (1)作为氢/电子供体清除自由基; (2)螯合过渡金属离子; (3)抑制自由基产生酶, 如脂氧合酶、环氧合酶和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶, 并增加抗氧化酶的反应能力^[61]。目前人们对多糖的抗氧化活性作用的研究成果很多, 大量研究结果表明, 从天然产物中分离纯化的多糖类物质能够清除活性氧自由基, 同时可以抑制脂质的过氧化作用^[12]、增强抗氧化酶活性、调节细胞凋亡中信号转导通路等^[62]。多糖的抗氧化能力主要与其单糖组成、分子量、结构及构象有关, 其构效关系复杂, 有待进一步研究^[63]。王茵等^[64]研究表明, 泥鳅多糖可以清除清除自由基, 并随

着质量浓度的升高对羟自由基的清除能力增强, 1 mg/mL 泥鳅多糖对羟自由基的清除率可达 73.38%, 同等浓度维生素 C 的羟基自由基清除率为 93.26%, 说明泥鳅多糖具有一定的抗氧化作用, 对于延缓机体衰老以及多种疾病的治疗发挥积极辅助作用, 因此泥鳅多糖的开发和利用具有较高的应用价值。

4.4 调节免疫

很多疾病的生成是由于免疫系统的紊乱造成的, 而多糖的生理功能之一是免疫调节, 通过多途径、多层面发挥作用, 作为一种免疫增强剂, 对特异性、非特异性免疫, 细胞、体液免疫都有作用, 可以调节机体的免疫系统^[17]。多糖免疫活性的差异可能与免疫细胞表面的不同受体或不同因素的组合有关^[65]。巨噬细胞在防御感染和抗肿瘤方面发挥着重要作用, 所以可以通过激活巨噬细胞提高机体免疫功能^[22]。ZHANG 等^[66]从泥鳅黏液中分离出一种中性游离多糖, 研究结果表明泥鳅多糖可以选择性地激活 T 细胞和巨噬细胞, 具有调节抗体和补体的作用, 促进免疫细胞分泌细胞因子调节其免疫活性。钦传光等^[67]观察泥鳅多糖对小鼠的免疫活性, 研究发现, 100 mg/kg 浓度的泥鳅多糖使刀豆蛋白 A 诱导的小鼠脾淋巴细胞增殖 A 值由 0.048 提高至 0.069, 增长率为 43.8%; 小鼠腹腔巨噬细胞吞噬鸡红细胞吞噬率由 39.0%增加至 42.7%; 小鼠血清溶血素含量由 60.0 mg/L 增加至 73.8 g/L。以上研究结果显示, 泥鳅多糖具有一定的免疫调节作用。

4.5 降血糖

降血糖多糖是近年来的研究热点之一, 有研究表明部分多糖具有安全性好、疗效确切、无副作用、改善糖尿病并发症等优点^[68]。糖尿病是一种常见的代谢疾病, 由于缺乏胰岛素或胰岛素作用受损引起^[69]。大多数糖尿病患者被诊断为非胰岛素依赖型糖尿病, 即 II 型糖尿病, 由胰岛素分泌和作用缺陷引起^[70]。机体的血糖水平由胰岛 α 细胞分泌的胰高血糖素和胰岛 β 细胞分泌的胰岛素保持平衡。当胰岛素分泌不足或者产生胰岛素抵抗的时候, 血糖超过正常范围, 平衡遭到破坏, 就可能引起糖尿病。多糖降血糖机制包括: (1)抑制胰岛 β 细胞凋亡; (2)通过抗氧化、抗炎、保护胰岛 β 细胞等途径促使胰岛素分泌; (3)改善胰岛素与靶细胞特异性结合, 提高胰岛素敏感性; (4)调节关键酶的活性、促进糖的吸收利用和代谢^[71]。ZHOU 等^[72]研究结果显示口服剂量为 50 mg/kg 泥鳅多糖可以使糖尿病小鼠的血糖由 21.8 mmol/L 降低到 17.8 mmol/L、血清总胆固醇由 5.1 mmol/L 下降至 3.7 mmol/L、甘油三酯由 1.6 mmol/L 下降至 1.4 mmol/L、低密度脂蛋白胆固醇水平由 1.2 mmol/L 下降至 0.9 mmol/L, 高密度脂蛋白胆固醇由 0.7 mmol/L 上升至 0.9 mmol/L, 胰岛素水平适度但显著升高, 同时糖尿病小鼠血清中肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6

水平降低,血清超氧化物歧化酶含量升高,其活性水平随浓度升高而增大,这表明泥鳅多糖具有较强的降血糖、抗炎和抗氧化水平,泥鳅多糖可能是治疗I型糖尿病的一个潜在选择。

4.6 抗炎

炎症可以使机体毛细血管扩张,通透性增大,中性粒细胞趋化、游走到炎症区,释放炎症介质从而引发炎症。多糖发挥抗炎作用的机制包括:抑制趋化因子和粘附因子的表达水平,促进及诱导细胞因子生成;活化T细胞,强化巨噬细胞的吞噬能力;使毛细管的通透性下降等^[73]。钦传光等^[74]研究了泥鳅多糖对5种抗炎实验模型的药理作用,结果显示泥鳅多糖可以抑制冰醋酸引起的小鼠毛细血管通透性增加,与空白对照组相比,20 mg/kg浓度的泥鳅多糖对冰醋酸引起的小鼠毛细血管通透性增加抑制率为49.0%;蛋清致小鼠足跖炎症肿胀体积由67.2 μL 减少至27.7 μL ,抑制率为58.8%;二甲苯致小鼠耳廓肿胀质量由8.2 mg减少至6.4 mg,抑制率为22.0%;羧甲基纤维素致小鼠胸腔渗出液中白细胞游走由9.4 cell/mm^3 减少至7.3 cell/mm^3 ,抑制率为21.8%;小鼠棉球肉芽肿胀质量由11.3 mg减少至10.4 mg,抑制率为8.0%。这表明,泥鳅多糖具有抗炎活性,其抗炎作用机制仍有待于进一步研究。

5 精深加工

目前为止,泥鳅主要用于直接食用,泥鳅精深加工发展缓慢,产业亟待完善,对于泥鳅生物活性成分的开发利用是泥鳅精深加工研究的重要方向。对于泥鳅多糖的提取分离、理化性质、化学结构等方面的研究还较少,大多集中在对泥鳅多糖生物活性的研究,但其作用机制有些尚未明确。为安全高效的获取泥鳅多糖,多糖的提取工艺仍需要经过不断的探索和发展,进行持续的更新和优化。多糖的生物活性和它的结构有直接联系,对泥鳅多糖的理化性质、结构及生理功能的深入研究,有助于明确泥鳅多糖的生物学活性及其作用机制,并为营养健康食品的设计开发提供理论和技术支持。对泥鳅进行精深加工以及高值化利用,开发新型功能性食品,增大泥鳅附加值,有利于推动泥鳅产业链延伸,有助于发挥泥鳅的营养和保健作用^[75]。

王茵等^[76]以泥鳅多糖为原料,利用 β -环状糊精进行包埋脱腥处理,经过风味调配,加入复合稳定剂,得到了泥鳅多糖饮料制备的最佳工艺,研制出的泥鳅多糖饮料风味醇厚、营养丰富、稳定性好。张家国等^[77]以泥鳅、枸杞、太子参等为主要原料制成复方泥鳅超微粉胶囊,并进行动物实验测定其抗疲劳特性,结果显示,小鼠负重游泳时间随给药剂量增加而延长,这表明复方泥鳅超微粉胶囊是具有抗疲劳功效的功能食品。

6 展望

多糖结构复杂,不同提取方法所获产品性质可能有较大差异,未来泥鳅多糖研究的方向是进一步创新泥鳅多糖的制备工艺,探索更高效的多糖提取工艺,降低损失率,获得稳定的工艺条件,制备得率及纯度更高的泥鳅多糖产品。目前,对于泥鳅多糖的研究大都集中在多糖的生物活性及作用机制,而对其构效关系及吸收代谢的研究较少,深入研究泥鳅多糖的理化性质、空间结构,充分发挥泥鳅多糖的生理药理作用,提升泥鳅的附加值并形成一定的产业链是未来发展的方向。

参考文献

- [1] 张杰. 泥鳅池塘高产养殖技术探讨[J]. 江西水产科技, 2018, 44(4): 34-35.
ZHANG J. Discussion on high-yield breeding technology of loach pond [J]. Jiangxi Fish Sci Technol, 2018, 44(4): 34-35.
- [2] ZHANG Q, SHANG MM, LING QF, et al. Hepatoprotective effects of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) lyophilized powder on dimethylnitrosamine-induced liver fibrosis in rats [J]. Arch Pharm Res, 2014, 37(6): 1-12.
- [3] LV ML, ZHAO XH. Chemical, volatile and textural attributes of a ready-to-eat fried loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. J Food Meas Charact, 2016, 10(2): 357-363.
- [4] 姚东瑞, 周鸣谦, 盘赛昆. 泥鳅深加工现状与发展展望[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(6): 122-127.
YAO DR, ZHOU MQ, PAN SK. Status and prospect of deep processing of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Progress Fish Sci, 2010, 31(6): 122-127.
- [5] HE DY, LI XY, SAI X, et al. *Camellia nitidissima* C. W. Chi: A review of botany, chemistry, and pharmacology [J]. Phytochem Rev, 2018, 17(2): 327-349.
- [6] CHEN C, ZHAO ZY, MA SS, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction, refinement and characterization of water-soluble polysaccharide from *Dictyosphaerium* sp. and evaluation of antioxidant activity *in vitro* [J]. J Food Meas Charact, 2020, 14(2): 963-977.
- [7] HOJJATI M, BEIRAMI-SERIZKANI F. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of a novel water soluble polysaccharide from *Cordia myxa* fruits [J]. J Food Meas Charact, 2020, 14(6): 3417-3425.
- [8] 朱晓霞, 罗学刚. 多糖提取与纯化技术应用进展[J]. 食品研究与开发, 2007, 27(3): 186-189.
ZHU XX, LOU XG. Progress in extraction and purification of polysaccharides [J]. Food Res Dev, 2007, 27(3): 186-189.
- [9] ZHANG QW, LIN LG, YE WC. Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review [J]. Chin Med, 2018, 13(1): 20-21.
- [10] 李瑶佳. 植物多糖提取方法研究进展[J]. 现代农业科技, 2019, 47(1): 222-223.
LI YJ. Research progress on extraction methods of plant polysaccharides [J]. Mod Agric Sci Technol, 2019, 47(1): 222-223.
- [11] ZUIN VG, RAMIN LZ. Green and sustainable separation of natural products from agro-industrial waste: Challenges, potentialities, and

- perspectives on emerging approaches [J]. *Top Curr Chem*, 2018, 376(1): 1–54.
- [12] 党超. 即食泥鳅开发及副产物多糖提取与结构分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- DANG C. The development of ready-to-eat loach food and extraction, structural analysis of its byproduct polysaccharide [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [13] 卓小月, 刘卫红, 杨志勇. 动物源活性多糖提取、纯化和结构鉴定技术的最新进展[J]. *当代化工研究*, 2020, 19(3): 44–47.
- ZHUO XY, LIU WH, YANG ZY. Advances of the animal-original polysaccharides: Extraction, purification and structure identification [J]. *Mod Chem Res*, 2020, 19(3): 44–47.
- [14] QIAN WW, YANG SQ, HU SM, *et al.* Enzymatic degradation, antioxidant and immunoregulatory activities of polysaccharides from brown algae *Sargassum fusiforme* [J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 149(8): 1–13.
- [15] VÁSQUEZ V, MARTÍNEZ R, BERNAL C. Enzyme-assisted extraction of proteins from the seaweeds *Macrocystis pyrifera* and *Chondracanthus chamissoi*: Characterization of the extracts and their bioactive potential [J]. *J Appl Phycol*, 2019, 31(3): 1999–2010.
- [16] TEJADA-ORTIGOZA V, GARCIA-AMEZQUITA LE, SERNA-SALDÍVAR SO, *et al.* Advances in the functional characterization and extraction processes of dietary fiber [J]. *Food Eng Rev*, 2016, 8(3): 251–271.
- [17] 党晓妍. 泥鳅多糖的提取及其抗氧化性能的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- DANG XY. Study on the extraction and antioxidant activity of polysaccharide from *Misgurnus anguillicaudatus* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [18] 任奕. 马齿苋多糖的研究进展[J]. *农业科技与装备*, 2017, 11(6): 61–62.
- REN Y. Research progress of portulaca polysaccharides [J]. *Agric Sci Technol Equip*, 2017, 11(6): 61–62.
- [19] WANG CY. A review on the potential reuse of functional polysaccharides extracted from the by-products of mushroom processing [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2020, 13(2): 217–228.
- [20] 何美佳, 刘晓, 唐翠翠, 等. 多糖脱蛋白方法的研究进展[J]. *中国海洋药物*, 2019, 38(3): 82–86.
- HE MJ, LIU X, TANG CC, *et al.* Research progress on the methods for deproteinization of polysaccharide [J]. *Chin J Mar Drug*, 2019, 38(3): 82–86.
- [21] 赵芷芊, 王敏, 张志清. 植物多糖的提取及抗氧化功效的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(13): 337–342.
- ZHAO ZQ, WANG M, ZHANG ZQ. Research progress of antioxidation efficacy and extraction of plant polysaccharide [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(13): 337–342.
- [22] 张宏伟. 泥鳅多糖的分离、纯化及其抗氧化活性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- ZHANG HW. Isolation, purification and antioxidative activity of polysaccharide from *Misgurnus anguillicaudatus* [D]. ChangChun: Jilin University, 2007.
- [23] 刘艳红, 唐祥, 李娅琳, 等. 活性多糖提取纯化及结构解析的研究进展[J]. *中国民族民间医药*, 2020, 29(3): 67–73.
- LIU YH, TANG X, LI YL, *et al.* A review about the research of extraction, purification and structure analysis of active polysaccharide [J]. *Chin J Ethnomed Ethnoph*, 2020, 29(3): 67–73.
- [24] 位迎雪, 宋春, 刘兴祖, 等. 牡蛎多糖的提取与纯化[J]. *科学养鱼*, 2020, 35(7): 68–69.
- WEI YX, SONG C, LIU XZ, *et al.* Extraction and purification of oyster polysaccharide [J]. *Sci Fish Farm*, 2020, 35(7): 68–69.
- [25] 李荣雪. 麻栎多糖的提取、纯化及其纯多糖的性质分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- LI RX. Extraction and purification of polysaccharides from quercus acutissima and property analysis of its pure polysaccharide [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.
- [26] 孙凯华. 海参斑软骨多糖的提取、纯化、结构鉴定及性质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- SUN KH. Extraction, purification, structure and properties of polysaccharides from lumpfish cartilage [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.
- [27] 张磊, 王锦旭, 杨贤庆, 等. 海洋动物多糖的研究进展[J]. *食品工业*, 2018, 39(1): 211–215.
- ZHANG L, WANG JX, YANG XQ, *et al.* Research progress of marine animal polysaccharides [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(1): 211–215.
- [28] 许政, 赵志强. 柱层析技术在中药材有效成分分离纯化中的应用[J]. *中国中医药信息杂志*, 2013, 20(12): 109–110.
- XU Z, ZHAO ZQ. Application of column chromatography technology in the separation and purification of effective components of Chinese medicinal materials [J]. *Chin J Inform Tradit Chin Med*, 2013, 20(12): 109–110.
- [29] 钦传光, 黄开勋, 徐辉碧. 凝胶过滤色谱法测定泥鳅多糖的组成及分子量[J]. *分析化学*, 2002, 28(4): 411–413.
- QIN CG, HUANG KX, XU HB. Determination of the composition and molecular weight of loach polysaccharides by gel filtration chromatography [J]. *Chin J Anal Chem*, 2002, 28(4): 411–413.
- [30] GUO QB, AI LZ, CUI SW. Methodology for structural analysis of polysaccharides [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [31] GHOLAMALI I. Stimuli-responsive polysaccharide hydrogels for biomedical applications: A review [J]. *Regen Eng Transl Med*, 2019, 168(13): 1–24.
- [32] 毛倩倩, 林久茂. 黄芪多糖抗肿瘤作用的研究进展[J]. *中医药通报*, 2020, 19(4): 69–72.
- MAO QQ, LIN JM. Research progress on anti-tumor effect of astragalus polysaccharide [J]. *Chin Med Bull*, 2020, 19(4): 69–72.
- [33] 廖宁波. 河蚬多糖结构特征、生物活性及其对人体肠道菌群的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LIAO NB. The structures and bioactivities of *Corbicula fluminea* polysaccharides and their effect on human intestinal microflora [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [34] LI Q, NIU Y, XING P, *et al.* Bioactive polysaccharides from natural resources including Chinese medicinal herbs on tissue repair [J]. *Chin Med*, 2018, 13(7): 1–11.
- [35] WANG Y, JIN H, DONG X, *et al.* Quality evaluation of *Lycium barbarum* (wolfberry) from different regions in China based on polysaccharide structure, yield and bioactivities [J]. *Chin Med*, 2019, 14(1): 1–10.
- [36] CASTANO J, GUADARRAMA-LEZAMA AY, HERNANDEZ J, *et al.* Preparation, characterization and antifungal properties of polysaccharide-

- polysaccharide and polysaccharide-protein films [J]. *J Mater Sci*, 2017, 52(1): 353–366.
- [37] 吴永霞, 吴皓, 狄留庆. 动物多糖的化学研究概况[J]. *时珍国医国药*, 2006, 16(4): 640–641.
- WU YX, WU H, DI LQ. General situation of chemical research on animal polysaccharides [J]. *Lishizhen Med Mater Med Res*, 2006, 16(4): 640–641.
- [38] TARASOV D, LEITCH M, FATEHI P. Lignin-carbohydrate complexes: Properties, applications, analyses, and methods of extraction: A review [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2018, 11(1): 269–297.
- [39] 周伟娥, 周学锋, 王宇阳, 等. 中药多糖成分前处理及检测方法研究进展[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(9): 1168–1175.
- ZHOU WE, ZHOU XF, WANG YY, *et al.* Research progress on pretreatment and analysis methods for polysaccharides in traditional Chinese medicine [J]. *J Instrum Anal*, 2020, 39(9): 1168–1175.
- [40] REUHS, BRADLEY L. Food analysis [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [41] DEGANI I, LA NASA J. Trends in high performance liquid chromatography for cultural heritage [J]. *Top Curr Chem*, 2016, 374(2): 263–291.
- [42] NIELSEN SS. Food analysis [J]. *Food Anal*, 2010, 2(14): 64–68.
- [43] 林夕梦. 碱提枣渣多糖的结构表征及抗氧化活性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- LIN XM. Study on structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from alkali extracted jujube dregs [D]. Xianyang: North West Agriculture and Forestry University, 2020.
- [44] QIN CG, HUANG KX, XU HB. Isolation and characterization of a novel polysaccharide from the mucus of the loach, *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Carbohydr Polym*, 2002, 49(3): 367–371.
- [45] CANDOĞAN K, ALTUNTSEĞ, İĞCI N. Authentication and quality assessment of meat products by fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy [J]. *Food Eng Rev*, 2020, 155(9): 251–277.
- [46] FAGHIHZADEH F, ANAYA NM, SCHIFMAN LA, *et al.* Fourier transform infrared spectroscopy to assess molecular-level changes in microorganisms exposed to nanoparticles [J]. *Nanotechnol Environ Eng*, 2016, 151(1): 1–16.
- [47] 霍琛鑫, 刘忠义, 严开川, 等. 多糖结构分析的研究进展[J]. *牡丹江医学院学报*, 2019, 40(6): 109–111.
- HUO CX, LIU ZY, YAN KC, *et al.* Research progress of polysaccharide structure analysis [J]. *J Mudanjiang Med Univ*, 2019, 40(6): 109–111.
- [48] AKASH MSH, REHMAN K. Essentials of pharmaceutical analysis [M]. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [49] 张蕊馨, 张彦华, 周迎春, 等. 中药多糖化学结构及药理作用研究进展[J]. *黑龙江中医药*, 2018, 47(1): 88–89.
- ZHANG RX, ZHANG YH, ZHOU YC, *et al.* Research progress on chemical structure and pharmacological action of polysaccharides from traditional Chinese medicine [J]. *J Heilongjiang Tradit Chin Med*, 2018, 47(1): 88–89.
- [50] 杨东达. 海参内脏多糖的分离、结构鉴定、免疫活性及其应用研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2020.
- YANG DD. Isolation, structure identification, immune activity and application of polysaccharide from sea cucumber viscera [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2020.
- [51] 陈大勇, 张凤先, 李慧萍, 等. 动物源多糖的药理活性研究进展[J]. *经济动物学报*, 2013, 17(2): 109–112.
- CHEN DY, ZHANG FX, LI HP, *et al.* Advances on pharmacological activity of polysaccharides from animal [J]. *J Econ Anim*, 2013, 17(2): 109–112.
- [52] 周军, 张晨晓, 黄开勋. 泥鳅多糖对小鼠耐缺氧作用的研究[J]. *中国药理学通报*, 2003, 19(10): 1182–1184.
- ZHOU J, ZHANG CX, HUANG KX. Study on the effect of loach polysaccharide on hypoxia tolerance in mice [J]. *Chin Pharm Bull*, 2003, 19(10): 1182–1184.
- [53] 李金华, 张玉英, 张惠琴, 等. 泥鳅粉对小鼠耐缺氧作用的研究[J]. *中国血液流变学杂志*, 2006, 16(2): 197–198.
- LI JH, ZHANG YY, ZHANG HQ, *et al.* Effects of *Misgurnus anguillicaudatus* powder on antihypoxia capacity in mice [J]. *Chin J Hemorheol*, 2006, 16(2): 197–198.
- [54] 张锐昌, 蒋秋燕, 张应龙, 等. 泥鳅的综合开发利用[J]. *食品与药品*, 2010, 12(5): 197–201.
- ZHANG RC, JIANG QY, ZHANG YL, *et al.* Comprehensive development and utilization of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Food Drug*, 2010, 12(5): 197–201.
- [55] 边亮, 陈华国, 周欣. 植物多糖的抗肿瘤活性研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 275–282.
- BIAN L, CHEN HG, ZHOU X. Recent advances in understanding the antitumor activity of polysaccharides from plants [J]. *Food Sci*, 2020, 41(7): 275–282.
- [56] ZHANG CX, HUANG KX. Mechanism of apoptosis induced by a polysaccharide, from the loach *Misgurnus anguillicaudatus* (MAP) in human hepatocellular carcinoma cells [J]. *Toxicol Appl Pharm*, 2006, 210(3): 236–245.
- [57] LI YY, CHEN JY, CAO LL, *et al.* Characterization of a novel polysaccharide isolated from *Phyllanthus emblica* L. and analysis of its antioxidant activities [J]. *J Food Sci Tech*, 2018, 55(7): 2758–2764.
- [58] ZHONG WQ, LIU N, XIE YG, *et al.* Antioxidant and anti-aging activities of mycelial polysaccharides from *Lepista sordid* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2013, 60(18): 355–359.
- [59] CHEN XY, JI HY, ZHANG CF, *et al.* Optimization of extraction process from *Taraxacum officinale* polysaccharide and its purification, structural characterization, antioxidant and anti-tumor activity [J]. *J Food Meas Charact*, 2020, 14(1): 194–206.
- [60] WEI PX, WENG WY. Characteristics of pressurized hot water extract from abalone muscle and the antioxidant ability during simulated digestion *in vitro* [J]. *J Food Sci Tech*, 2020, 57(11): 4076–4083.
- [61] KOLSI RBA, GARGOURI B, SASSI S, *et al.* *In vitro* biological properties and health benefits of a novel sulfated polysaccharide isolated from *Cymodocea nodosa* [J]. *Lipids Health Dis*, 2017, 16(1): 252–255.
- [62] 高静. 天然抗氧化剂及其协同作用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(6): 1859–1864.
- GAO J. Natural antioxidants and synergistic effects [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(6): 1859–1864.
- [63] CHEN Y, MAO WJ, YAN MX, *et al.* Purification, chemical characterization, and bioactivity of an extracellular polysaccharide produced by the marine sponge endogenous fungus *Alternaria sp.* SP-32 [J]. *Mar Biotechnol*, 2016, 18(3): 301–313.

- [64] 王茵, 党晓妍, 何国森, 等. 泥鳅多糖抗氧化活性的研究[J]. 福建农业学报, 2017, 32(8): 917–920.
WANG Y, DANG XY, HE GS, *et al.* Antioxidant activity of polysaccharides from loach [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2017, 32(8): 917–920.
- [65] ZHANG WJ, WANG S, KANG CZ, *et al.* Pharmacodynamic material basis of traditional Chinese medicine based on biomacromolecules: A review [J]. *Plant Methods*, 2020, 16(1): 1–28.
- [66] ZHANG CX, HUANG KX. Characteristic immunostimulation by MAP, a polysaccharide isolated from the mucus of the loach, *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Carbohydr Polym*, 2005, 59(1): 75–81.
- [67] 钦传光, 黄开勋, 徐辉碧. 泥鳅多糖的免疫作用研究[J]. 中国药理学杂志, 2002, 37(8): 588–591.
QIN CG, HUANG KX, XU HB. Investigation on immunomodulating activities of polysaccharide from loach mucus [J]. *J Chin Pharm Sci*, 2002, 37(8): 588–591.
- [68] CHEN HX, WANG YJ. Structure and health effects of natural products on diabetes mellitus [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [69] WU SJ, LU MS, WANG SJ. Hypoglycaemic and hypolipidaemic properties of peach gum polysaccharides [J]. *Biotech*, 2017, 7(3): 166.
- [70] SONG HM, SUN ZX. Hypolipidaemic and hypoglycaemic properties of pumpkin polysaccharides [J]. *3 Biotech*, 2017, 7(3): 159.
- [71] 顾龙玥, 孙晓晶, 初侨, 等. 动物多糖降血糖作用及机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7674–7683.
GU LY, SUN XJ, CHU J, *et al.* Research progress in hypoglycemic effect and mechanism of animal polysaccharides [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(21): 7674–7683.
- [72] ZHOU J, YAN JY, BAI ZS, *et al.* Hypoglycemic activity and potential mechanism of a polysaccharide from the loach in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 121(1): 199–206.
- [73] 刘丽霞, 牛梦莉, 王静, 等. 多糖的抗炎机制研究进展[J]. 内蒙古医科大学学报, 2015, 37(S1): 218–220.
LIU LX, NIU ML, WANG J, *et al.* Research progress on the plant polysaccharide of anti-inflammatory mechanism [J]. *J Inner Mongolia Med Univ*, 2015, 37(S1): 218–220.
- [74] 钦传光, 黄开勋, 徐辉碧. 泥鳅多糖抗炎作用的实验研究[J]. 中国药理学通报, 2001, 17(6): 715–716.
QIN CG, HUANG KX, XU HB. Experimental study on anti-inflammatory effects of the polysaccharide from the loach mucus [J]. *Chin Pharm Bull*, 2001, 17(6): 715–716.
- [75] 党晓妍, 王茵, 吴成业, 等. 泥鳅高值化开发利用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(1): 20–26.
DANG XY, WANG Y, WU CY, *et al.* Research progress on the high-value development and utilization of loach [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(1): 20–26.
- [76] 王茵, 郭书悦. 泥鳅多糖饮料的研制[J]. 福建农业科技, 2019, 49(6): 45–48.
WANG Y, GUO SY. Development of loach polysaccharide beverage [J]. *Fujian Agric Sci Technol*, 2019, 49(6): 45–48.
- [77] 张家国, 孙静, 潘洪民. 复方泥鳅超微粉胶囊抗疲劳的动物性实验研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(9): 174–177.
ZHANG JG, SUN J, PAN HM. An animal experiment of physical fatigue resistance with compound loach superfine powder capsule [J]. *Food Res Dev*, 2019, 33(9): 174–177.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



韩淙琳, 硕士, 主要研究方向为食品科学与营养。

E-mail: 18722212017@163.com



李 茜, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: limengqia@163.com



张 民, 博士, 教授, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: zm0102@tust.edu.cn