

三角帆蚌副产物中活性成分研究进展

Advances on bioactive compounds of by products from *Hyriopsis cumingii*

董 烨<sup>1</sup> 余 婷<sup>1</sup> 王建辉<sup>2</sup> 王允祥<sup>1</sup> 范 丽<sup>1</sup> 王 贺<sup>1</sup>

DONG Ye<sup>1</sup> YU Ting<sup>1</sup> WANG Jian-hui<sup>2</sup> WANG Yun-xiang<sup>1</sup> FAN Li<sup>1</sup> WANG He<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学暨阳学院, 浙江 绍兴 311800;

2. 长沙理工大学化学与生物工程学院湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114)

(1. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Shaoxing, Zhejiang 311800, China; 2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Food Processing of Aquatic Biotic Resources, School of Chemistry and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**摘要:**三角帆蚌是中国特有的优质淡水珍珠养殖品种,在采珠过程中会产生大量的蚌肉、外套膜、蚌泪等富含营养物质的副产物。文章概述三角帆蚌采珠后的副产物中营养成分及特点,着重阐述三角帆蚌副产物中多糖、蛋白质、多肽等活性成分的研究现状,并对三角帆蚌副产物中活性成分的研究方向进行展望。

**关键词:**三角帆蚌;生物活性;多糖;抗氧化肽

**Abstract:** Triangle pearl mussel (*Hyriopsis cumingii*) is a superior Chinese freshwater pearl mussel species. After harvesting the pearl from the mussel large quantities of by-products are generated as waste, which includes meat, mantle and mussel tears. However, it is known that processing by-products are rich sources of nutritional substances. The present study briefly analyzed the chemical composition and characterization of mussel by-products. Especially, this paper summarized the research progress of bioactive compounds from mussel by-products such as polysaccharide, protein and peptide. Future research prospects of bioactive compounds from mussel by-products are also outlined.

**Keywords:** *Hyriopsis cumingii*; bioactivity; polysaccharide; antioxidant peptide

三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*),俗称河蚌、珍珠蚌等,为中国现有最主要的淡水育珠蚌。据统计<sup>[1]</sup>,2010 年中国淡水珍珠产量超过  $1.0 \times 10^3$  t,约占全世界的 95%。随着珍

珠养殖产业的不断发展,采珠过程中不可避免地产生大量蚌肉、外套膜和蚌泪等副产物。根据联合国粮农组织(FAO)报告<sup>[2]</sup>,2014 年全世界蚌肉产量高达  $9.0 \times 10^4$  t。而蚌肉因肉质粗韧且土腥味重,并受制于采珠后续处理技术,多用于饲料加工或作为废弃物被丢弃<sup>[3]</sup>,造成了资源的严重浪费和环境的污染。研究<sup>[4]</sup>显示,蚌肉和外套膜蛋白含量高且种类丰富,蚌泪含糖量较高。从化学组成及应用潜力来看,取珠后的副产物是一种质优价廉的资源,若能通过嫩化处理工艺提高其食用品质开发风味独特、肉质脆嫩的蚌肉制品,或利用现代提取技术制备高纯度蛋白质、高活性多糖等经济价值更高的功能性配料,将对促进三角帆蚌副产物增值化利用,提升珍珠产业可持续发展水平具有重要意义。本文从三角帆蚌副产物的主要组成及特点、有效成分研究等角度进行概述,并就下一步研究方向提出建议,旨在为三角帆蚌副产物的深入研究及综合利用提供借鉴。

1 三角帆蚌副产物主要成分

三角帆蚌副产物主要指在采珠过程中产生的蚌肉、外套膜、蚌泪等。张缓等<sup>[5]</sup>对河蚌副产物的基本营养成分进行分析,发现其所含粗蛋白和总糖含量均较高,见表 1。

氨基酸分析结果表明,蚌肉、外套膜和蚌泪中人体必需氨基酸占总氨基酸的比例为 42%~45%,均高于 WHO/FAO

表 1 采珠后河蚌副产物的基本营养成分

Table 1 Nutrimental components in the by-products of freshwater mussels originated from pearl-fishing

| 名称  | 粗蛋白   | 总糖    | 粗脂肪  | 水分    | 灰分    |
|-----|-------|-------|------|-------|-------|
| 蚌肉  | 51.07 | 26.65 | 7.40 | 76.92 | 7.10  |
| 外套膜 | 47.72 | 34.90 | 5.37 | 82.44 | 10.01 |
| 蚌泪  | 43.84 | 38.46 | 3.97 | 89.31 | 8.34  |

**基金项目:**绍兴市大学生科技创新项目(编号:JYSXKC1601);长沙理工大学湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心开放基金资助项目(编号:2015GCZX05);浙江农林大学暨阳学院 2014 年科研发展基金项目(编号:JYMS1409)

**作者简介:**董烨,女,浙江农林大学暨阳学院在读本科生。  
**通信作者:**王贺(1983—),男,浙江农林大学暨阳学院讲师,博士。  
E-mail:wh2989@zafu.edu.cn

**收稿日期:**2017—06—14

提出的推荐值和常见淡水鱼肌肉必需氨基酸含量<sup>[6-7]</sup>,其中一些呈味氨基酸(谷氨酸、天冬氨酸)含量也较高<sup>[8]</sup>。河蚌副产物中还含有较为丰富的不饱和脂肪酸(如二十碳五烯酸、二十二碳六烯酸),脂溶性维生素 A 和 D 以及人体必需微量元素如钙、磷、铁等有益于人体健康的营养成分<sup>[5, 9]</sup>。从化学组成和营养价值角度讲,河蚌副产物是一种丰富、廉价的优良资源。

## 2 三角帆蚌副产物中有效成分研究

### 2.1 三角帆蚌多糖提取、分离纯化与结构

蚌肉多糖为三角帆蚌主要生理活性物质,于 2012 年被中国卫生部批准为新资源食品,为蚌肉多糖在食品中的进一步推广应用提供了重要依据。目前,对河蚌多糖的研究主要集中于提取纯化、结构解析与生物活性方面(见表 2)。

现有研究显示,河蚌多糖分子质量分布范围为  $1.56 \times 10^5 \sim 1.741 \times 10^6$  Da<sup>[11-12]</sup>;其单糖组成主要为葡萄糖、鼠李

糖、半乳糖、甘露糖、阿拉伯糖和岩藻糖<sup>[10]</sup>,受原料种类、提纯方法、分析手段等影响,还含有少量木糖<sup>[11]</sup>。关于糖链结构的研究报道较少。Dai 等<sup>[11]</sup>发现河蚌水溶性多糖为(1→4)键连接的  $\beta$ -D-吡喃葡萄糖构成主链;Hu 等<sup>[13]</sup>研究得出纯化河蚌多糖骨架由  $\alpha$ -1,4 键连接的 D-葡萄糖组成,平均每 5 个葡萄糖残基带有 1 个 6-O- $\alpha$ -D-葡萄糖取代基。

### 2.2 三角帆蚌多糖生物活性

2.2.1 抗肿瘤 早在 2003 年,胡健饶等<sup>[19]</sup>发现河蚌多糖具有抗小鼠 HepA 腹水瘤作用,推测其抗肿瘤活性可能与抑制瘤细胞 DNA 合成和细胞增殖,提高小鼠胸腺指数和脾脏指数有关。另有学者<sup>[20-21]</sup>发现河蚌多糖对 S<sub>180</sub> 瘤、H<sub>22</sub> 瘤和黑色素瘤也有明显抑制作用。Qiu 等<sup>[14]</sup>研究揭示自河蚌外套膜提取的水溶性多糖对人肝癌细胞的抑制机理,可能与其诱导癌细胞进入 G<sub>0</sub>/G<sub>1</sub> 停滞和凋亡期,导致 mRNA 及 c-myc、bcl-2 和 cyclinD1 等蛋白质表达水平下降,以及促使 ROS 量

表 2 河蚌多糖的提取、分离纯化、单糖组成及分子质量

| Table 2 Extraction, isolation, monosaccharide composition and molecular weights of <i>Hyriopsis cumingii</i> polysaccharides |        |                                               |       |                   |                                             |                                                       |                                                                                                 |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 提取材料                                                                                                                         | 提取方法   | 提取条件                                          | 提取率/% | 脱蛋白方法             | 纯化手段                                        | 单糖组成                                                  | 分子质量/Da                                                                                         | 文献   |
| 蚌肉                                                                                                                           | 热水浸提   | 80 ℃、料液比 1 : 8 (g/mL)、浸提 4.5 h                | 3.66  | Sevag 法           | DEAE-52 离子交换纤维、Sephadex G-100               | HCPS1(阿拉伯糖和葡萄糖)、HCPS2(葡萄糖)、HCPS3(鼠李糖、岩藻糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖) | HCPS1 (4.322 × 10 <sup>5</sup> )、HCPS2 (4.579 × 10 <sup>5</sup> )、HCPS3(5.031×10 <sup>5</sup> ) | [10] |
|                                                                                                                              |        | 80 ℃、料液比 1 : 8 (g/mL)、浸提 2 h、提取 2 次           | 4.60  | Sevag 法           | DEAE-52 离子交换纤维、Sephadex G-200、凝胶渗透色谱        | HCLPS-1 为葡萄糖和木糖(35 : 1)                               | HCLPS-1 组分重均分子质量为 1.56×10 <sup>5</sup>                                                          | [11] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 热水浸提   | —                                             | —     | 酶法                | Marco-Prep DEAE 离子交换色谱填料、Sephacrose 6B      | —                                                     | MPa-I (1.589×10 <sup>6</sup> )、MPaII(1.741×10 <sup>6</sup> )                                    | [12] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 热水浸提   | 100 ℃、液料比 1 : 3 (g/mL)、浸提 1 h、浸提 2 次          | 2.50  | Sevag 法           | 超滤、fast flow DEAE-Sephacrose、Sephadex G-200 | HP-I 组分由 D-葡萄糖构成                                      | HP-I 组分重均分子质量为 2.65×10 <sup>5</sup>                                                             | [13] |
| 外套膜                                                                                                                          | 热水浸提   | 100 ℃、固液比 1 : 2 (g/mL)、提取时间 3 h、提取 2 次        | —     | 十六烷基三乙基溴化铵法(CATB) | —                                           | —                                                     | —                                                                                               | [14] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 超声波    | 50 ℃、固液比 1 : 12 (g/mL)、超声功率 600 W、提取时间 48 min | 4.61  | Sevag 法           | —                                           | —                                                     | —                                                                                               | [15] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 微波法    | 微波功率 1 080 W、料液比 1 : 15 (g/mL)、时间 2.5 min     | 4.06  | Sevag 法           | —                                           | —                                                     | —                                                                                               | [16] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 高压脉冲电场 | 电场强度 25 kV/cm、脉冲数 8、料液比 1 : 40 (g/mL)         | 4.99  | —                 | —                                           | —                                                     | —                                                                                               | [17] |
| 蚌肉                                                                                                                           | 超高压    | 压力 340 MPa、保压时间 10 min、料液比 1 : 42 (g/mL)      | 7.12  | —                 | —                                           | —                                                     | —                                                                                               | [18] |

升高等有关。此外,Qiao 等<sup>[22]</sup>还应用鸡胚绒毛尿囊膜血管生成模型研究了河蚌多糖对新生血管形成的影响。这些研究表明,河蚌多糖可通过调节或增强机体免疫功能发挥抗肿瘤作用。

2.2.2 调节免疫 近年来,河蚌多糖的免疫调节活性受到学者的高度关注。陈文星等<sup>[23]</sup>证实河蚌多糖对氢化可的松致免疫低下小鼠 B 淋巴细胞转化有增殖作用。Dai 等<sup>[11]</sup>研究发现河蚌水溶性多糖在体内外条件下均能明显促进由刀豆蛋白和脂多糖诱导的脾细胞增殖,并能有效提高 2,4-二硝基氟苯诱导的迟发型超敏反应强度,表明该多糖可以提高机体特异性和非特异性细胞免疫应答。Qiao 等<sup>[22, 24]</sup>报道了河蚌粗多糖和 3 个纯化组分(HCPS-1、HCPS-2 和 HCPS-3)均能显著地促进脾细胞增殖,提高腹腔巨嗜细胞酸性磷酸酶活性,增强腹腔巨嗜细胞的趋化、增殖和吞噬能力,且 HCPS-3 的体外免疫调节活性最强。在此基础上,Qiao 等<sup>[25]</sup>利用 RT-PCR 分析手段首次从基因水平上揭示河蚌粗多糖能促进环磷酸腺苷致免疫低下小鼠脾脏中免疫受体[Toll 样受体-4 (TLR-4)、甘露糖受体(MR-1)]、细胞因子 IL-6 及其肿瘤坏死因子 TNF- $\alpha$  的 mRNA 合成,提高脾脏和血清中 TLR-4、MR-1、核转录因子  $\kappa$ B(NF- $\kappa$ B)、IL-6 和 TNF- $\alpha$  的基因表达水平,且呈现剂量依赖关系;还指出粗多糖和 3 个纯化组分对腹腔巨噬细胞 MR-1 和 NF- $\kappa$ B 的表达水平也随多糖浓度增加而升高,其中以 HCPS-3 的上调表达最大。此外,陈晶晶<sup>[26]</sup>证明河蚌多糖可通过增加肠黏膜相关免疫细胞数量,提高肠道溶菌酶活性,促进肠道菌群平衡,进而增强罗非鱼肠道黏膜免疫功能。就目前的研究现状而言,河蚌多糖的免疫调节活性作用机理非常复杂,还需要进一步深入研究。

2.2.3 抗氧化 作为动物性天然多糖的重要来源之一,河蚌多糖的抗氧化活性一直是研究热点。林双喜<sup>[27]</sup>研究发现河蚌多糖不仅在体外对羟基自由基( $\cdot$ OH)和超氧阴离子自由基( $O_2^- \cdot$ )显示出良好的清除能力,而且还可提高罗非鱼体内超氧歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性,降低血清中丙二醛含量,但体内抗氧化活性与河蚌多糖浓度不存在剂量效应关系。刘俊等<sup>[28]</sup>报道河蚌粗多糖清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基(DPPH $\cdot$ )和烷基自由基的能力明显,而对 $\cdot$ OH 和  $O_2^- \cdot$  的清除效果却为负值,但该多糖的抗氧化活性与其纯度呈正相关关系。Qiao 等<sup>[29]</sup>研究指出河蚌粗多糖和 3 个纯化组分均具有较强的清除  $H_2O_2$ 、 $O_2^- \cdot$ 、DPPH $\cdot$  能力及还原力,其中 HCPS-3 除螯合金属能力外均比其他组分具有更强的体外抗氧化活性;小鼠试验证实了该粗多糖还具有较强的体内抗氧化能力,且呈现明显的剂量依赖性关系。李世芬等<sup>[30]</sup>在考察河蚌多糖对老龄小鼠的抗氧化效果时发现高剂量组肝组织中蛋白质羰基含量(PCC)显著低于对照组,尽管多糖抗氧化与 PCC 含量相关性未被证实,但该研究结果为解析河蚌多糖的抗氧化作用机制提供了基础数据。

2.2.4 其他生物活性 关于河蚌多糖的其他生物活性研究比较分散,且缺乏系统性,因此目前难以对其作用机制有深入的认识。例如,陈蕾等<sup>[31]</sup>认为河蚌多糖可能通过其抗氧

化活性对四氯化碳所致肝细胞损伤提供保护作用,而新近研究<sup>[32]</sup>显示河蚌多糖的保护机制或许与其发挥的抗炎作用有关。随着研究的深入,发现河蚌多糖还具有保护大鼠脑缺血再灌注损伤<sup>[13]</sup>、抑菌<sup>[15]</sup>、镇痛与抗炎<sup>[33]</sup>、抗病毒<sup>[34]</sup>等活性。

### 2.3 三角帆蚌蛋白及其多肽

三角帆蚌副产物蛋白质含量丰富,近年来很多学者就其如何开发利用进行了深入研究。Liu 等<sup>[35]</sup>采用碱提酸沉法从蚌肉中回收蛋白质,回收率达 94.7%,其中必需和半必需氨基酸占 48.9%;与大豆分离蛋白和卵蛋白相比,蚌肉蛋白质的吸水/油性和起泡性更好,但乳化性一般。严如娟等<sup>[36]</sup>对蚌肉和外套膜中的可溶性蛋白进行提取,回收率分别为 73.41%和 66.21%,SDS-PAGE 结果显示 2 个部位的水溶性蛋白图谱较一致,而外套膜的盐溶性蛋白条带较多,可溶性蛋白中必需氨基酸含量为 46.28%~50.46%。郭福军<sup>[37]21-23</sup>在 50℃、pH 6.5 条件下利用木瓜蛋白酶和复合风味蛋白酶协同酶解蚌肉 5 h,蛋白质回收率达 79.32%。也有学者<sup>[38]</sup>将高压脉冲电场技术用于蚌肉蛋白质的制备,在 20 kV/cm、脉冲数 8 的条件下提取 2 h,提取率为 77.08%。研究还显示,酶解能使蚌肉蛋白质溶解性提高<sup>[37]24-25</sup>;高压脉冲电场处理既能提高蚌肉蛋白质溶解性和乳化性,也会降低其起泡性<sup>[38]</sup>。由此可知,因制备方法不同,所得河蚌蛋白质功能特性也各不相同。此外,有学者<sup>[39]</sup>在低温条件下用 0.3 mol/L NaCl 从河蚌脏器中提取糖蛋白含量为 3.763%,初步提纯的 3 个组分也表现出较强的抗氧化活力。

对河蚌多肽的研究主要集中在多肽制备、分离提纯、生物活性等方面,涉及多肽活性位点、一级结构与功能关系等研究较少。宋亮等<sup>[40]</sup>从 6 种不同类型蛋白酶中确定胃蛋白酶水解得到的蚌肉多肽对血管紧张素转化酶的抑制率最高。戴志远等<sup>[41-42]</sup>报道了在酶/底物比 1.64%、pH 9.12 和酶解温度 57℃条件下蚌肉经碱性蛋白酶 Alcalase 2.4 L 水解得到的酶解产物量最高,用 Sephadex G-50 从酶解物中纯化获得分子质量为 1.3 kDa 的组分显示出良好的降血压作用。为全面准确评价蚌肉抗氧化肽的制备工艺,涂宗财等<sup>[43]</sup>以 DP-PH $\cdot$ 清除率、 $\cdot$ OH 清除率及水解度为指标,选用木瓜蛋白酶水解蚌肉,通过正交试验得到优化工艺为:酶解温度 60℃、pH 6.5、酶解时间 5 h、料液比 3:10 (g/mL)、加酶量 6 000 U/g。徐兆刚<sup>[44]</sup>研究发现超声波辅助中性蛋白酶酶解蚌肉制备多肽的综合抗氧化能力强于普通酶解法,本就具有较强抗氧化活性的组分(分子质量<3 kDa)经 Sephadex G-25 纯化后其还原力、自由基清除能力及对亚油酸自氧化抑制能力进一步提高,同时还指出纯化后的河蚌抗氧化肽中的疏水性氨基酸含量也有所升高。

最近,一些学者还对河蚌多肽与钙、锌等离子的螯合及其机理的研究产生浓厚兴趣。为拓展河蚌多肽应用领域,涂宗财等<sup>[45]</sup>提出了木瓜蛋白酶酶解制得的河蚌多肽与钙离子的螯合工艺,在螯合时间 45 min、螯合温度 35℃、肽钙比 4.5:1 (g/g)、pH 9.5 和固液比 1:30 (g/mL)的条件下,肽钙螯合率为 31.47%。在此基础上,该研究小组<sup>[46]</sup>通过超声波改性河蚌多肽提高了其与钙离子的螯合能力,在超声功率

160 W、超声温度 50 ℃、超声时间 10 min 和液固比 40 : 1 (mL/g)的条件下,改性肽钙中钙质量分数为 6.04%;通过红外光谱、扫面电镜等检测手段表明改性肽是以离子键、配位键等方式与钙离子结合形成肽钙螯合物。周龙<sup>[47]</sup>研究发现,在pH 7.61、螯合温度 65 ℃、多肽与锌质量比 1.5 : 1 的条件下,多肽中锌螯合率为 39.82%,但该研究并未就螯合锌是否形成进行验证。刘佳彤<sup>[48]</sup>将木瓜蛋白酶酶解的蚌肉氨基酸与从蚌壳中提取的可溶钙直接螯合制备了可食性复合氨基酸螯合钙,在螯合温度 46 ℃、钙源与蚌肉复合氨基酸体积比为 1 : 2、pH 7.1、反应时间 99 min 的条件下,钙螯合率为 29.77%,通过红外光谱也确证了螯合钙产品中螯合物的存在。

2.4 其他活性成分

已有的研究主要集中在河蚌多糖、蛋白质等生物大分子方面,然而关于小分子活性成分的研究却不多。姚静倩等<sup>[49-50]</sup>较系统地研究了河蚌水提液中除去多糖与蛋白质后的小分子活性物质,证明了具有抗炎活性的有效成分为甾醇类和核苷类化合物,其中核苷类化合物主要为胸腺嘧啶、尿嘧啶、次黄嘌呤、黄嘌呤和尿苷;同时还分析了石油醚萃取部分的脂肪酸含量中不饱和脂肪酸占比达 45%,显著高于饱和脂肪酸,不饱和脂肪酸以亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸和花生四烯酸为主。近年来,抗菌肽的研究与应用受到越来越多的关注<sup>[51]</sup>。新近研究<sup>[52]</sup>表明,来源于河蚌的抗菌肽是一种阳离子多肽,对细菌、真菌等具有较强的杀伤作用,被视为抗生素的理想替代品之一。Xu 等<sup>[53]</sup>利用 *Escherichia coli* BL21 实现河蚌抗菌肽(theromacin)cDNA 异源表达,并发现该抗菌肽可能是通过破坏细菌质膜结构,引起细胞内容物渗出而对革兰氏阳性细菌产生抗菌作用。

3 结语

目前,国内外围绕蚌肉的多糖提纯与生物活性、酶解制备活性肽开展的研究比较多,而对外套膜、蚌泪中组分(如蛋白质、多糖和脂质)以及三角帆蚌副产物中其他小分子活性成分的研究则较少。为开发利用三角帆蚌副产物中活性成分提供理论依据和技术支撑,建议下一步研究可从以下几个方面加强或深入:① 开发高效的副产物回收和利用方法;② 阐明三角帆蚌多糖、活性肽的构效关系;③ 加强对其他活性成分基础研究;④ 开展三角帆蚌副产物加工关键技术研究,推动以其活性成分为主的功能性食品、食品添加剂与配料、医药原料等产品的创制及产业化应用。

参考文献

[1] WANG Gui-ling, XIA Xiu-lin, LI Xi-lei, et al. Identification and expression analysis of the MSP130-related-2 gene from *Hyriopsis cumingii*[J]. Genetics & Molecular Research, 2015, 14(2): 4 903-4 913.

[2] FAO. FAO yearbook; Fishery and aquaculture statistics 2014 [R].Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016: 11.

[3] 王伯华, 龙娇丽, 雷颂, 等. 谷氨酰胺转氨酶及辅料对珍珠蚌肉

208

糜凝胶性质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 12-16.

[4] 周海燕, 刘振华, 刘承初, 等. 采珠后三角帆蚌肉和外套膜的营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2007, 27(11): 170-173.

[5] 张缓, 姜启兴, 许艳顺, 等. 采珠后河蚌副产物的营养成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 346-349.

[6] 颜孙安, 林香信, 钱爱萍, 等. 化学分析法的理想参考蛋白模式及其化学生物价研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 101-107.

[7] 王桂芹, 孙丽, 李子平, 等. 不同食性鱼类的含肉率及肌肉营养组成与评价[J]. 饲料工业, 2010, 31(A01): 94-98.

[8] SILVA V M, PARK K J, HUBINGER M D. Optimization of the enzymatic hydrolysis of mussel meat[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): C36-C42.

[9] 鲁燕骅. ICP-AES 分析河蚌肉中 14 种微量元素[J]. 光谱实验室, 2011, 28(2): 878-884.

[10] QIAO De-liang, HU Bing, GAN Dan, et al. Extraction optimized by using response surface methodology, purification and preliminary characterization of polysaccharides from *Hyriopsis cumingii*[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(3): 422-429.

[11] DAI Zhi-yuan, ZHANG Hong, ZHANG Yan-ping, et al. Chemical properties and immunostimulatory activity of a water-soluble polysaccharide from the clam of *Hyriopsis cumingii* Lea[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77(2): 365-369.

[12] 张燕平, 戴志远, 刘俊, 等. 三角帆蚌多糖的纯化工艺研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(5): 135-140.

[13] HU Chang-feng, LI Jin-hui, YANG De-yu, et al. A neuroprotective polysaccharide from *Hyriopsis cumingii*[J]. Journal of Natural Products, 2010, 73(9): 1 489-1 493.

[14] QIU Shui-qing, HUANG Shu-ling, HUANG Juan, et al. Antitumor activity of the water-soluble polysaccharide from *Hyriopsis cumingii* in vitro[J]. Toxicology & Industrial Health, 2010, 26(3): 151-161.

[15] 乔德亮, 何晓梅, 韦传宝, 等. 三角帆蚌多糖的超声波辅助提取及体外抗菌活性[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 72-76.

[16] 乔德亮, 孙传伯, 何晓梅, 等. 三角帆蚌多糖的微波辅助提取及脱蛋白工艺[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(6): 902-908.

[17] 周亚军, 贺琴, 吴都峰, 等. 高压脉冲电场辅助提取河蚌多糖工艺优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 236-240.

[18] 张斌, 孙兰萍, 施颖, 等. 基于人工神经网络法优化河蚌多糖超高压提取工艺[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 148-153.

[19] 胡健饶, 曹明富. 三角帆蚌多糖抑瘤作用的实验研究[J]. 中国现代应用药学, 2003, 20(1): 11-13.

[20] 罗宇慧, 彭蕴茹, 叶其正. 河蚌多糖抗肿瘤实验研究[J]. 江苏中医药, 2007, 39(10): 72-73.

[21] 陈文星, 吴皓, 陆茵, 等. 珠蚌多糖对实验性移植肿瘤及 NK 细胞活性的作用[J]. 中国海洋药物, 2007, 26(2): 30-33.

[22] QIAO De-liang, WEI Chuan-bao, KE Chun-ling, et al. Effects of *Hyriopsis cumingii* polysaccharides on angiogenesis, macrophage chemotaxis, proliferation and phagocytosis[J]. Food & Function, 2015, 6(3): 869-877.

[23] 陈文星, 吴皓, 金亦涛. 珠蚌多糖的免疫调节作用研究[J]. 中药药理与临床, 2001, 17(5): 16-18.

[24] QIAO De-liang, LUO Jian-guang, KE Chun-ling, et al. Immu-

nostimulatory activity of the polysaccharides from *Hyriopsis cumingii* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(5): 676-680.

[25] QIAO De-liang, HE Xiao-mei, WEI Chuan-bao, et al. Effects of *Hyriopsis cumingii* polysaccharides on mice immunologic receptor, transcription factor, and cytokine[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(5): H1 288-H1 294.

[26] 陈晶晶. 河蚌多糖对罗非鱼肠道黏膜免疫和菌群的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2009: 51.

[27] 林双喜. 河蚌多糖的生物学活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007: 54.

[28] 刘俊, 张燕平, 戴志远, 等. 三角帆蚌多糖的提取及其抗氧化功能研究[J]. 食品科技, 2008, 33(12): 40-44.

[29] QIAO De-liang, KE Chun-ling, HU Bing, et al. Antioxidant activities of polysaccharides from *Hyriopsis cumingii* [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(2): 199-204.

[30] 李世芬, 胡奇, 王玉翠, 等. 河蚌多糖对老龄小鼠的抗氧化作用[J]. 现代预防医学, 2015, 42(6): 99-101.

[31] 陈蕾, 吴皓, 姚静倩, 等. 珠蚌多糖对四氯化碳诱导肝细胞损伤的保护作用[J]. 中国海洋药物, 2008, 27(2): 18-21.

[32] 刘仁平, 杨旭, 张维娅, 等. 蚌肉多糖对四氯化碳诱导急性肝损伤小鼠的保护作用[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2015, 39(6): 602-605.

[33] 史万忠, 刘瑾, 倪嘉纳, 等. 河蚌多糖粗提物的分级醇沉及其活性研究[J]. 时珍国医国药, 2012, 23(9): 2 191-2 192.

[34] 朱涛, 赵前进, 许礼发, 等. 河蚌多糖抗 HBV 活性及连分式插值法检测[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42(3): 186-189.

[35] LIU Cheng-chu, ZHOU Hai-yan, SU Yi-cheng, et al. Chemical compositions and functional properties of protein isolated from by-product of triangle shell pearl mussel *Hyriopsis cumingii* [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2009, 18(3): 193-208.

[36] 严如娟, 刘承初, 李应森, 等. 三角帆蚌肉和外套膜中可溶性蛋白的回收与性质比较[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 334-337.

[37] 郭福军. 河蚌蛋白粉的制备及其抗氧化活性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.

[38] ZHOU Ya-jun, HE Qin, ZHOU Dan. Optimization extraction of protein from mussel by high-intensity pulsed electric fields [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2016, 41(3): e12 962.

[39] 何晓梅, 乔德亮, 沈涛涛, 等. 三角帆蚌糖蛋白的盐溶液浸提及抗氧化活性[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(5): 517-523.

[40] 宋亮, 沈慧星, 肖扬. 珍珠河蚌肉酶解制备 ACE 抑制肽研究[J]. 食品科技, 2007(10): 133-137.

[41] 戴志远, 朱凤仙, 张燕平, 等. 河蚌酶降解血压肽的初步分离及性质研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(4): 76-79.

[42] DAI Zhi-yuan, ZHANG Yan-ping, ZHANG Hong, et al. Preparation and characterization of mussel (*mytilus edulis*) protein hydrolysates with angiotensin-I-converting enzyme (ACE) inhibitory activity by enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Food Biochemistry, 2012, 36(1): 66-74.

[43] 涂宗财, 罗晓慧, 王辉, 等. 多指标优化珠蚌抗氧化肽制备工艺[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 213-216.

[44] 徐兆刚. 河蚌抗氧化肽的制备及其特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 85-86.

[45] 涂宗财, 李春平, 王辉, 等. 木瓜蛋白酶水解珠蚌制备肽钙及其红外光谱分析[J]. 食品科技, 2012, 37(7): 92-96.

[46] 王辉, 涂宗财, 叶云花, 等. 超声波改性珠蚌多肽与钙离子的螯合[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(4): 12-16.

[47] 周龙. 珍珠蚌肉酶解液多肽锌螯合研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014: 21-27.

[48] 刘佳彤. 河蚌肉/大豆粕酶解氨基酸螯合钙的制备及特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 70.

[49] 姚静倩, 吴皓, 王令充, 等. HPLC 测定三角帆蚌中主要核苷类成分的含量[J]. 中国海洋药物, 2009, 28(4): 31-34.

[50] 姚静倩. 珠蚌软体中小分子活性物质的研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2009: 64-65.

[51] 王文军, 曾凯芳, 邓丽莉, 等. 抗菌肽及其在果蔬病害控制中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 199-204.

[52] NATARAJAN S B, KIM Y S, HWANG J W, et al. Immunomodulatory properties of shellfish derivatives associated with human health [J]. RSC Advances, 2016, 6 (31): 26 163-26 177.

[53] XU Qiao-qing, WANG Gai-ling, YUAN Han-wen, et al. cDNA sequence and expression analysis of an antimicrobial peptide, theromacin, in the triangle-shell pearl mussel *Hyriopsis cumingii* [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology, 2010, 157(1): 119-126.

(上接第 204 页)

[33] 张红. 浓酱兼香型白云边酒酿造工艺与微生物分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015: 25-32.

[34] 胡国栋. 白云边酒特征香味组份的研究[J]. 酿酒, 1992(1): 76-83.

[35] 熊小毛. 兼香型白酒标准研究[J]. 酿酒科技, 2001(5): 47-49.

[36] 张五九, 何松贵, 韩兴林, 等. 豉香型白酒风味成分分析研究[J]. 酿酒科技, 2010(12): 58-64.

[37] 曾新安, 张本山, 于淑娟. 豉香型米酒特征香气成分研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001(12): 93-95.

[38] 胡国栋. 景芝白干特征香味组份的研究[J]. 酿酒, 1992(1): 83-88.

[39] 傅国城. 西凤酒微量物质组分与质量关系的研究[J]. 酿酒, 2015(3): 10-14.

[40] 李维青. 漫谈白酒的香型[J]. 中国酒, 2007(7): 84-86.

[41] 赵树欣, 邹海晏. 白酒香型对白酒发展的影响[J]. 酿酒科技, 2010(4): 108-110.

[42] 李大和, 李天道, 李国红. 中国白酒口味的变化[J]. 酿酒科技, 2011(9): 128-131.

[43] 傅国城. 中国白酒香型划定背景与主流发展趋势的探讨[J]. 酿酒, 2010(1): 97-99.

[44] 熊子书. 白酒的香型和风格[J]. 酿酒, 1984(2): 9-12.

[45] 杜明松. 论白酒新工艺与新工艺白酒[J]. 酿酒科技, 2008(7): 65-68.