

林恒宗, 高加龙, 范秀萍, 等. 双壳贝类净化技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 449–457. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070148

LIN Hengzong, GAO Jialong, FAN Xiuping, et al. Research Progress on Depuration Technology of Bivalves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 449–457. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070148

· 专题综述 ·

双壳贝类净化技术研究进展

林恒宗^{1,2,3}, 高加龙^{1,2,3,4}, 范秀萍^{1,2,3,4}, 林海生^{1,2,3,4}, 曹文红^{1,2,3,4}, 梁志源¹, 黄艳平¹,
章超桦^{1,2,3,4}, 秦小明^{1,2,3,4,*}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524025;

2. 国家贝类加工技术研发分中心(湛江), 广东湛江 524025;

3. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 水产品深加工广东普通高校重点实验室, 广东湛江 524025;

4. 广东省海洋食品工程技术研发中心, 海洋生物制品工程重点实验室, 广东湛江 524025)

摘要: 为提升鲜活贝类品质与食用安全性, 解决贝类前处理加工中净化效率低, 污染物难以脱除, 净化过程损耗等难题。本文从贝类对污染物蓄积及转化代谢规律、净化方法及影响净化效果的关键因子进行了综述, 并指出在净化过程中应采用多种净化方法组合或优化、加强冷杀菌技术, 益生菌制剂在活体贝类净化中的应用研究、开发绿色高效安全净化剂、研发新型净化设备与现代化净化工厂设计、及时制定与更新贝类净化行业标准等建议, 以期为深入开展贝类净化相关研究提供参考。

关键词: 双壳贝类, 净化技术, 贝类污染物, 蓄积代谢

中图分类号: S985.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)11-0449-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070148

本文网刊:



Research Progress on Depuration Technology of Bivalves

LIN Hengzong^{1,2,3}, GAO Jialong^{1,2,3,4}, FAN Xiuping^{1,2,3,4}, LIN Haisheng^{1,2,3,4}, CAO Wenhong^{1,2,3,4},
LIANG Zhiyuan¹, HUANG Yanping¹, ZHANG Chaohua^{1,2,3,4}, QIN Xiaoming^{1,2,3,4,*}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China;

2. National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing, Zhanjiang 524025, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524025, China;

4. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Zhanjiang 524025, China)

Abstract: To improve the quality and food safety of live shellfish, solve the problems of low depuration efficiency, difficulty in pollutants desorption and the loss during depuration. In this paper, the accumulation and metabolism of pollutants, depuration methods, key factors of depuration effect of shellfish are discussed, combination and optimization of depuration methods, cold sterilization technology are recommended to use during depuration. Research on the application of probiotic in the depuration, development of green and efficient safe purification agents and new depuration equipment, modern depuration plants design, timely formulate and update industry standards for shellfish depuration are presented as suggestions in the paper to provide a reference for in-depth research on shellfish depuration.

Key words: bivalve; depuration technology; shellfish pollutants; accumulation and metabolism

我国是贝类养殖大国, 贝类年产量已连续多年位居世界首位。据《中国渔业统计年鉴》显示, 2019

年我国贝类产量高达 1439 万吨, 占世界贝类总年产量的 60% 以上^[1]。近年来, 由于海洋污染加剧, 贝类

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0901601)。

作者简介: 林恒宗(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 贝类净化及保活运输技术, E-mail: 1074680995@qq.com。

* 通信作者: 秦小明(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 贝类净化和水产品保活运输技术, E-mail: xiaoming0502@21cns.com。

生存环境受到挑战,双壳贝类作为一种滤食性生物极易吸附海洋中的有毒污染物,如致病菌、贝类毒素、重金属和农药残留物等,并进一步在体内多种生物酶的催化下发生转化和代谢,食用后对人体健康造成极大威胁。日本、加拿大、法国等多个国家均有关于消费者因食用不洁净贝类而引起的大面积中毒感染现象的报道^[2],同时贝类污染也一直制约着我国产业发展和国际贸易。因此,鲜活贝类在进入市场前进行净化显得尤为重要。

目前,国内外关于双壳贝类净化方法可归结为灭菌海水暂养净化、物理吸附法、化学降解法和生物代谢法等,各种净化方法都有其独特的优势与局限性。传统技术,如采用紫外线、臭氧、氯气对暂养净化海水进行灭菌,该方法对受到致病性微生物污染的贝类有较好的净化效果,但对受到重金属(heavy metals, HMs)、持久性有机物(persistent organic pollutants, POPs)、贝类毒素等污染的双壳贝类脱除效果不佳。化学降解法虽能加速贝类体内污染物的排出,但净化后其化学残留物质可能对人体健康构成威胁。生物代谢净化技术凭借其天然、无毒、不易产生二次污染等优势,成为近年来的研究热点。除净化方法外,贝类净化效率还与多因素有关,如污染物种类及在贝体内存在形态、贝类种间差异、受污染程度和净化工艺条件等。

本课题组长期致力于活体贝类净化的相关研究,在香港牡蛎^[3]、菲律宾蛤仔^[4]、波纹巴非蛤^[5]上均取得重要成效,但当前如何提高净化效率、缩短净化时间、减少净化过程损耗、降低净化成本、保障贝类食用安全性和高品质仍是产业关注焦点。基于此,文章拟从双壳贝类主要污染物及在活贝体内蓄积与转化规律、国内外贝类净化方法及其应用效果、影响贝类净化效果的关键因子等相关方面进行综述,分析活贝净化现存问题,展望贝类净化技术未来发展趋势,以为贝类产业研究及从业人员提供理论参考。

1 贝类中污染物种类及富集、转化和清除规律

1.1 贝类中主要污染物

海洋污染物在整个食物链的主要传递媒介为双

壳贝类,研究发现双壳贝类体内富集的污染物明显比其他种类生物要多^[6]。为准确探究双壳贝类净化难易程度,表 1 总结了影响贝类食用安全的污染物种类及来源。这些污染物以溶解、乳化及悬浮态等形式存在,贝类通过滤食将这些有毒有害污染物进一步蓄积及转化。

1.2 贝类污染物蓄积、转化及清除规律

污染物在贝内蓄积能力决定了其净化的难易程度。由于双壳贝类滤食不具有选择性,因此污染物进入活贝体内通常有两种途径:一是通过腮呼吸作用直接吸收水体中溶解态的污染物,二是摄取食物中的微态污染颗粒进入消化系统随血液流通迅速分布到组织中^[10]。贝类对污染物的富集能力受污染物种类、贝类品种、生理状态、暴露在污染环境时间长短等因素的影响,通常活贝对污染物富集能力依次为致病性微生物、贝类毒素、HMs、POPs^[11]。此外,由于组织功能的差异性,各组织对不同污染物的蓄积能力存在明显差异。主要表现为消化腺和腮是双壳贝类蓄积 HMs 的主要靶器官。MARKICH 等^[12]对贻贝(*Mytilus edulis*)不同组织中 HMs 含量分析发现,各组织 HMs 含量为消化腺>外套膜>闭壳肌>生殖腺>体液。内脏团及消化腺是蓄积贝类毒素最主要的部位,蓄积含量最高可占贝体内总毒素的 90% 以上^[6]。LI 等^[13]对扇贝(*Patinopecten yessoensis*)和蛤蜊(*Saxidomus purpuratus*)进行了毒素分析,发现毒素主要蓄积在消化系统中。此外,肠道及性腺是聚集致病性微生物的主要部位^[14]。但污染物蓄积规律在不同贝类中存在例外,如奶油蛤(*Saxidomus giganteus*)将其毒素蓄积在含黑色素较多的出、入水管^[15]。

污染物进入活贝体内后在特定条件下可发生相互转化,并对其生理代谢产生影响,一般来说,转化可分为体内生物转化与体外转化。SHIMADA 等^[16]发现贝类毒素在生物体内转化过程中非极性与脂溶性的毒素会生成水溶性更强的代谢产物,经过生物降解排出体外,而少部分则通过代谢活化产生活性氧自由基(ROS),造成严重的氧化应激反应。但由于污染物类型、贝种类之间差异、代谢机理不同决定了其能否

表 1 贝类主要污染物及来源

Table 1 Main pollutants of shellfish and its sources

污染方式	污染物种类	主要污染物	来源	参考文献
感染	细菌	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)、沙门氏杆菌(<i>Salmonella</i>)、李斯特菌(<i>Listeria monocytogenes</i>)、副溶血性弧菌(<i>Vibrio parahaemolyticus</i>)、金黄葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)	生活污水、养殖尾水	[7]
	病毒	诺如病毒(norwalk viruses, NOV)、甲型肝炎病毒(hepatitis A virus, HAV)、轮状病毒(rotavirus, RV)和星状病毒(astrovirus)	生活污水、养殖尾水	[7]
	重金属	铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)	工业废水、矿山泥污、地壳岩石风化	[8]
蓄积	有机物	二恶英、多氯联苯、多环芳烃、石油烃、农药	化学农药、工业残渣、废水、大气沉降、	[9]
	贝类毒素	麻痹性贝类毒素(paralytic shellfish toxins, PSTs)、腹泻性贝类毒素(diarrhetic shellfish poisonings, DSPs)、神经性贝类毒素(neurotoxic shellfish poisonings, NSPs)、失忆性贝类毒素(amnestic shellfish poisonings, ASPs)	有毒藻类(甲藻、硅藻等)	[7]

在短时间内脱除。长牡蛎(*Crassostrea gigas*)在暴露实验中能够快速将病原微生物清除到体外,具有清除速度快,清除率高等特点^[17]。田华等^[18]研究了栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、和竹蛏(*Solen strictus*)不同组织 PSTs 的体外转化反应,发现 PSTs 存在明显的组织及物种特异性。HMs 由于其具有较强的富集能力,因此,其较难通过体内转化将金属离子排出体外^[12]。当活贝体内蓄积污染物及转化产物超出机体正常承载水平后,便会对机体防御系统造成损伤,导致贝体内 DNA、脂类氧化损伤,细胞凋亡等一系列生物毒性效应,但生物体可通过调节自身抗氧化酶(SOD、MDA、CAT、GSH-Px)活力变化以减少危害提升净化效率^[19]。因此,分析不同贝种、不同个体、不同组织对污染物富集、转化和代谢特征,对于选取适宜的净化方式具有重要的意义。

2 贝类净化方法及应用效果研究进展

为了有效脱除双壳贝类体内致病性微生物、HMs 和化学污染物,贝类净化技术的研究已成为行业热点。目前,双壳贝类净化技术主要分为灭菌海水暂养法、物理净化法、化学净化法、生物学净化法。

2.1 灭菌海水暂养法

灭菌海水暂养法是贝类净化中最常用的方法,即采用紫外(UV)、臭氧(O₃)、氯及氯化物等方法对海水减菌处理,利用贝类体内自身代谢活动,将受到污染的贝类置于无菌海水中暂养净化。表 2 是不同海水减菌处理方法主要作用机理与优缺点比较。紫外线是贝类净化中最广谱、经济的方法,其对贝体内大肠菌群、副溶血性弧菌和霍乱弧菌等致病菌有较好的净化效果。ANDRITSOS 等^[20]采用紫外净化系统(SDS)对循环海水灭菌,用于贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)暂养净化,结果显示,净化 24 h 后贻贝体内大肠菌群数量显著降低,净化率可达 99%,然而该方法对病毒的脱除效果并不理想。大量研究表明,二氧化氯在净化活贝体内细菌和病毒具有良好的效果,POLO 等^[21]研究证明,海水中二氧化氯浓度为

2 ppm 时,能加速蛤蜊(*Venerupis pullastra*)和贻贝体内 NOV 和 HAV 的清除。但海水中氯浓度对净化效果至关重要,浓度过高易导致贝类死亡,且残留氯对生食贝类风味和口感产生较大影响。此外,臭氧具有弥散性、强氧化性等特点能有效杀灭活贝体内致病菌和病毒。AMOROSO 等^[22]的研究表明,当海水中臭氧浓度达 5 mg/L,净化 48 h 能够脱除贻贝体内 89% 病毒。然而,臭氧稳定性较差,易受到温度、盐度、海水洁净程度的影响,从而削弱了灭菌效果,此外,海水中臭氧浓度高于 0.5 mg/L 对贝类产生毒性作用^[23]。

采用传统或单一灭菌方式存在净化效率低,耗时长等问题,因此,可采用组合方式来增强净化效果,如:紫外线-臭氧^[22]、紫外线-二氧化氯^[21]能提高净化效率。近年来,由稀氯化钠或盐酸溶液制备的酸性电解水(pH5.0~6.5)应用于贝类暂养净化阶段可有效提高净化效率,如李国威等^[24]采用微酸电解水(SEAW)净化虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)时发现,随着净化处理时间延长,净化 8 min 扇贝表面及水体中弧菌由>1100 降至 28 MPN/g。此外,采用酸性电解水(pH3.1; ORP 1150 mV; ACC 10 mg/L)净化菲律宾蛤仔(*Venerupis philippinarum*)和紫贻贝(*Mytilus edulis*),其体内菌落总数显著降低且保证存活率^[25]。总体来说,采用灭菌海水暂养净化法可在一定程度上脱除贝体内微生物、病毒且效率高,但对于受到 HMs、贝类毒素、POPs 污染的贝类影响不大,且采用该方法长时间净化容易造成贝类营养、风味成分损耗。因此,对于受到轻度污染的贝类可采用该净化方法,但难以大规模应用于受深度污染的双壳贝类净化中。

2.2 物理净化法

物理净化法是一种不改变污染物化学形态,利用吸附、过滤、沉淀、曝气等原理,直接将贝类生理代谢产生大量悬浮颗粒、HMs 等污染物从水中去除的方法。贝壳^[30]、活性炭^[31]、沸石^[32]、黏土^[33]等均可用于双壳贝类净化的吸附剂。FIORATI 等^[34]研究

表 2 不同方法对海水减菌处理主要作用机理与优缺点比较
Table 2 Comparison of main action mechanism and advantages and disadvantages of different seawater sterilization treatment methods

净化方法	净化/灭菌机理	优点	缺点	参考文献
紫外线	破坏微生物DNA中嘌呤和嘧啶的不饱和键	杀菌性能优、成本低、可持续工作	海水浑浊度影响灭菌效果,核心部件紫外灯管寿命短、效率低	[26]
氯及氯化物	微生物的内酶失活,破坏蛋白质	杀菌效果好、低成本、不破坏营养物质	对贝类刺激,潜在化学毒性,残留物对人体有害	[26]
臭氧	破坏微生物细胞结构、内源酶,导致裂解死亡	低残留、无遗传毒性、杀菌效果好	稳定性差,含量过高影响贝类呼吸代谢	[27]
臭氧-紫外线	臭氧被紫外线激活,产生氧化性极强的羟基自由基	杀菌效果极佳、速效持续	易受到水质条件影响,需连续不断灭菌	[28]
电解水	穿透微生物细胞膜使其代谢受阻	操作简单、速效持续、无残留	有效氯含量易降解,只能杀灭表面微生物	[24]
天然提取物	破坏微生物细胞结构	生态性、再生性、不易造成二次污染	需要联合其他方法使用	[29]

发现,纤维素基纳米海绵可高效吸附海水中的 Cd、Cr、Cu 等离子,且不影响贝活力。王浩等^[30]采用牡蛎壳、沸石、活性炭吸附材料对牡蛎进行净化,得出三种吸附材料脱除牡蛎体内 HMs 效果为活性炭>牡蛎壳>沸石。吸附材料特性对净化效果有着密切的影响。QIU 等^[31]比较了 8 种不同粒径的活性炭对受到 PSTs 污染贻贝进行吸附,发现净化 1 d 和 3 d 后贻贝体内 PSTs 分别降低了 41% 和 68%。此外,有研究指出沸石对致病性微生物吸附效果较为显著。GDOURA 等^[32]采用天然沸石材料对蛤蜊(*Ruditapes decussatus*)净化 24 h,发现大肠菌群含量由最初的 18000 降至 53 MPN/g,沙门氏杆菌也降至最低检测值。由于改性黏土(MC)具有良好的吸附性和膨胀性,近年来已广泛应用于双壳贝类净化中。LI 等^[33]发现 MC 的应用可以有效地防止双壳类摄入有毒藻类细胞,并通过沉淀沉积物中的有毒藻类细胞来减少毒素的积累,且沉积物中毒素更易脱除。此外,废弃贝壳、稻壳、食物果皮、蛇纹石等均具有较强的吸附能力,将这些固态废物经过处理也可成为新型吸附材料^[35]。

近年来,新型冷杀菌技术,如:高压静水技术、辐照技术、高密度 CO₂ 等,在水产品储藏与保鲜加工中研究的非常多,它能高效杀灭病原微生物、病毒和寄生虫,且较好地保存水产品原有的口感风味,但应用于活体双壳贝类暂养净化阶段还未见报道^[36]。总的来说,物理净化法具有吸附容量大、可循环利用等优点,但耗时长,容易造成二次污染,难以去除溶解性有机物,因此,如何将传统物理净化法与新型冷杀菌技术相结合应用于活体贝类暂养净化中是未来应该深入研究探讨的问题。

2.3 化学净化法

化学净化法是在净化用水中加入化学试剂,让贝类摄食后能起到吸附或拮抗污染物,从而生成一系列的反应,以加快贝体内污染物的排出速度,是净化 HMs 效果最为显著的方法。常见的净化试剂有乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、

维生素 C、壳聚糖及衍生物、金属硫蛋白(MTs)等(表 3)。

FANG 等^[44]实验表明,壳聚糖微粒(CMs)对牡蛎(*Crassostrea virginica*)净化过程中创伤弧菌去除效果显著,净化 48 h 后其体内创伤性弧菌降至 2.0 log CFU/g。类似地,XIE 等^[45]研究指出,壳聚糖对牡蛎净化过程中 PSTs 具有较好的脱除效果。研究发现净化过程中添加 EDTA 钠盐不仅可以改良水质,且可降解贝体内 HMs, BUDIAWAN 等^[46]采用曝气灭菌水循环系统与净化过程中加入 EDTA 相结合净化青贻贝(*Perna viridis*),发现 *Perna viridis* 组织中 Hg、Pb 含量显著降低。但由于贝类代谢能力较差,对重金属敏感性低,导致其在体内蓄积量大,因此在净化过程中加入强氧化剂可加速重金属离子排出体外,李学鹏^[47]将褶牡蛎(*Alectryonella plicatula* Gmelin)暴露在浓度为 200 mg/L 维生素 C 海水中,净化 31 d,发现维生素 C 可诱导 HMs 排出,其体内 Cu、Pb、Cd 的排出率分别为 32.3%、64.8% 和 31.4%。

近年来,绿色、安全、高效的化学脱除剂的筛选、制备、利用成为研究新趋势。金属硫蛋白备受关注,它具有结合金属能力和高诱导特性的低分子量蛋白质,对 Zn、Cd、Ca 等目标离子有非常强的亲和力。ZHANG 等^[42]采用 MTs 水解物(pH-Fe²⁺)对蓝贻贝净化,发现净化 15 d 后,Cd 浓度从 46.1 μg/g 降至 23.3 μg/g。此外,在贝类水解液脱除 HMs 工艺中也有非常多具有潜力的脱除剂,如:柠檬酸、琥珀酸、植酸、螯合树脂和离子交换型树脂等脱除剂在净化重金属方面效率高且用时短,但应用于活体双壳贝类暂养净化阶段还未见报道^[48]。总体来说,采用化学法净化双壳贝类可在一定程度上脱除活体贝类体内的 HMs、贝毒素及致病性微生物,但容易产生化学残留,在加入化学试剂的同时易对双壳贝类生理反应及代谢造成影响。因此,急需开发绿色、安全、高效的脱除剂以保证净化效果和品质。

2.4 生物学净化法

生物学净化法是指将有益微生物菌群混合,抑

表 3 不同化学净化剂对双壳贝类重金属脱除效果

Table 3 The removal effect of different purifiers on heavy metals in bivalves

净化试剂	净化对象	重金属	净化时间(d)	净化效果(%)	参考文献
维生素C	近江牡蛎	Cu	21	51.2	[37]
EDTA-Na ₂	栉孔扇贝	Cd	0.5	20	[38]
ZnSO ₄	栉孔扇贝	Cd	0.5	20	[38]
柠檬酸钠	栉孔扇贝	Cd	0.5	20	[38]
脱乙酰壳聚糖	贻贝	Hg	1	96.51	[39]
壳聚糖	近江牡蛎	Cr	21	41.27	[36]
羧甲基壳聚糖	近江牡蛎	Cd	6	43.8	[40]
壳寡糖钙	栉孔扇贝	Cd	3	46	[41]
壳寡糖镁	栉孔扇贝	Cd	3	41.8	[41]
MTs	蓝贻贝	Cd	15	50.5	[42]
硒化卡拉胶	紫贻贝	Cd	6	38	[43]

制有害菌繁殖,或通过食物链将具有可促进污染物排出的饵料投喂给受污染的贝类,以提高贝类代谢活力,达到减少生物体中污染物的目的。利用天然产物净化双壳贝类是生物净化法研究的新趋势。SHEN 等^[29]采用加入葡萄籽提取物(GSE)的紫外辐照人工海水(ASW)对太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)进行净化,发现当 ASW 中 GSE 浓度在 1.0% 或 1.5% 时,副溶血性弧菌分别降低 3.01 和 4.18 log MPN/g。类似地,赵明明等^[49]以葡萄牙牡蛎(*Crassostrea angulata*)为研究对象,在净化过程中加入大蒜素,净化 12 和 24 h 后,其体内大肠菌群含量由最初的 2307 MPN/100 g 分别降至 240 和 189 MPN/100 g,达到生食标准。RONG 等^[50]采用抗菌多肽用于牡蛎净化,发现净化 36 h 后其体内副溶血性弧菌含量降低了 2.35~2.76 log CFU/g。由于贝类滤食藻类不具有选择性,在暂养净化过程中投喂适宜饵料如:金藻、扁藻、小球藻及藻类孢子等能降低贝类在净化过程中营养成分损耗,且提高代谢活力加快贝体内污染物的排出速率。叶挺等^[51]利用大型海藻龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)净化葡萄牙牡蛎,发现净化 14 d 后贝体内 Cu、Cd、Pb 含量分别为 1.93、0.58、0.33 mg/kg,均低于检测限值。

近年来,益生菌制剂在水产养殖中研究的非常多,如:枯草芽孢杆菌、酵母菌、乳酸菌等,它能净化水质、预防疾病、且绿色、安全。姚茹等^[52]发现,在牡蛎养殖水体中加入微生态制剂及微藻,能降低水中 NH₃、NaNO₂ 含量,同时可促进牡蛎体内蓄积 HMs 排出。益生菌制剂在活贝净化中具有重要的研究价值和广阔的应用前景。总体来说,采用生物学净化法其成本低、适应范围广、具有生态性和再生性、不会造成二次污染,适合大批量工厂净化。

3 影响双壳贝类净化效果关键因子

贝类在净化过程中实际上是其自然滤食将体内污染物排出的过程,研究表明适宜的环境及生理条件能提升贝类的净化效率^[53]。影响贝类净化的工艺条件与环境因子主要包括污染物种类、净化时间、净化方法、贝水比、净化系统设计、水质参数如:盐度、温

度、pH 等。国内外关于双壳贝类净化条件的探索越来越多,部分双壳贝类最佳净化工艺条件如表 4 所示。

3.1 污染物因素

海洋污染物种类繁多,理化性质不同,在贝类中积累分布组织也产生差异,对净化效果也产生了直接影响。大量研究表明,双壳贝类一旦受到重金属、贝类毒素、POPs 污染将很难在短时间内通过净化排除食用风险,能在短期内达到净化目的几类污染物中,净化难易程度依次为泥沙、致病性微生物、病毒。BRAGA 等^[57]研究发现,采用紫外循环灭菌海水净化感染石房蛤毒素和 PSTs 的紫贻贝,净化 10 d 后其脱除率分别为 23.4% 和 57.8%。祁剑飞等^[54]采用流水式紫外线杀菌方法对葡萄牙牡蛎净化 48 h,得出菌落总数和大肠菌群含量均大幅下降,但 HMs、POPs 等指标基本无变化。此外,脱除效率还与污染物类型直接相关,研究人员在脱除贻贝体内 HMs 时发现其含量递减顺序为 Pb>Co>Cd>Cr>Cu>Mn>Ni>Zn>Fe^[58]。因此,贝类净化需根据去除目标污染物,选择适宜的净化方法。

3.2 贝种间差异及受污染程度

不同贝类对污染物的蓄积敏感性存在明显差异,污染物能否被及时脱除也因受污染程度相关。LOVE 等^[59]采用海水循环系统净化美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)和蛤蜊(*Mercinaria mercinaria*),发现不同物种之间对污染物脱除效率存在明显差异,净化 5 d 后,美洲牡蛎体内污染物净化率从高到低依次为:MS2(phages)>大肠杆菌>粪肠球菌>脊髓灰质炎病毒>HAV,但蛤蜊则表现为:大肠杆菌>粪肠球菌>HAV>MS2(phages)>脊髓灰质炎病毒。牡蛎和贻贝等物种能在短时间内降解贝类毒素,而在重金属方面牡蛎则表现出强吸附性的特点,TAKATA 等^[60]发现,牡蛎在循环式海水中净化 48 h,其体内 PSTs 降低了 68%。邴晓菲等^[61]研究指出,栉孔扇贝对 PSTs 呈现出迅速蓄积和缓慢代谢的特点。此外,贝类原生环境及沉积物中污染物浓度对贝类污染程度产生直接的影响。WANG 等^[62]对中国胶州湾地区菲律宾蛤仔体内 HMs 含量分析,发现菲律宾蛤仔组织内

表 4 部分双壳贝类的最佳净化工艺条件
Table 4 The best depuration process conditions for some bivalves

种类	水质参数		净化时间(h)	工艺条件	净化效果	参考文献
	温度(℃)	盐度(‰)				
太平洋牡蛎	15/25	28~31	36	紫外灭菌及超滤膜过滤海水,贝水比 1:6,水交换率3次/h	大肠菌群净化效果显著	[17]
香港牡蛎	20	25~27	24	紫外循环及臭氧灭菌海水,浓度 0.15 mg/L,海水流量5 m ³ /h	菌落总数由净化前4.2×10 ⁵ 降至 2.2×10 ⁴ CFU/g	[3]
葡萄牙牡蛎	28	28	48	紫外循环灭菌海水,贝水比1:10,水交换率3 h/次	菌落总数下降了95.45%,大肠菌群下降了98.75%	[54]
虾夷扇贝	15	31	24~36	紫外循环灭菌海水,贝水比1:20	净化24~36 h菌落总数显著降低	[55]
波纹巴非蛤	25	25	24	紫外循环灭菌海水,贝水比1:15	大肠菌群、菌落总数显著降低	[5]
泥蚶	20~25	21.5	24	臭氧浓度0.4~1.6 mg/L或二氧化氯浓度5~20 mg/L	净化5 h吐泥完成,净化24 h,菌落总数下降90%	[56]

Cd、Zn 和 Cr 含量与栖息沉积物中的含量显著相关。总体而言,需净化贝类所受污染程度越小,净化时间及成本也就越低。

3.3 净化过程水质参数

净化过程水质参数,如水温、盐度、pH、溶解氧、氨氮等对活贝张壳、滤水等生理活动有重要影响,从而直接影响双壳贝类体内污染物的排出。温度是净化过程中水质条件的关键影响因子,研究表明,适当提升水温能减缓贝类应激反应,降低净化过程死亡率及提升净化效果^[63]。POMMEPUY 等^[64]发现,温度<16℃,净化7~11d长牡蛎体内病毒降低1个对数值,当海水温度>20℃,净化3~4d即可下降1个对数值。PHUVASATE 等^[65]发现水温在7~15℃条件下,净化5d,太平洋牡蛎体内副溶血弧菌低于3 log MPN/g,且存活率最高。类似地,FARRELL 等^[66]研究指出,提升海水温度也能加速牡蛎中 PSTs 蓄积及代谢。盐度影响贝类的渗透压,从而改变其滤水率,盐度高低直接影响贝类的代谢速率。在采用紫外循环灭菌海水净化太平洋牡蛎体内副溶血性弧菌时发现,海水盐度为20‰~30‰条件下优于10‰^[67]。JAHROMI 等^[68]发现,牡蛎在20‰低盐度条件下净化效果最差,而珍珠贝(*Pinctada martensii*)则耐受多种盐度(20‰~40‰)。因此,净化需与贝类源生长环境条件紧密结合,根据要去除的目标污染物,在净化过程中选择适宜净化条件,以达到高效净化的目的。

3.4 净化工艺条件

净化工艺设计条件不合理,容易对贝类造成二次污染。包括贝水比、水流量、净化池排污能力、净化层数等。林清等^[28]采用紫外臭氧组合净化近江牡蛎,分别设置不同贝水比1:5、1:10、1:15,得出随着贝水比增加,各个试验组的大肠菌群及菌落总数呈下降趋势。慕翠敏^[17]研究不同工艺条件对太平洋牡蛎大肠杆菌消除影响,发现贝水比1:6,水交换率3次/h,净化层数为上层时,净化效果最佳。此外,水流速度决定了净化池的排污效率,近江牡蛎在净化过程中,当水交换率4次/h时,体内大肠菌群由13.4降至3 MPN/g,净化效果优于2次/h和8次/h^[28],水流量的选择应综合考虑污物的排出和水体的净化。

4 总结与展望

双壳贝类中,海洋污染物超标已成为阻碍贝类产业发展的主要障碍,因此,及时掌握海洋环境及贝类污染状况,研究污染物在贝体内蓄积及转化规律,科学、有针对性地运用不同净化活贝方法具有重要意义。但我国作为双壳贝类产量大国,因净化成本高,技术相对薄弱,虽经过净化工序流程,但质量稳定性差,常在保活流通过程中易滋生病原菌造成安全隐患。要实现贝类净化技术产业化,取得国际市场认可,需在以下方面继续深入研究:a.加强养殖海域卫生管理,从源头解决双壳贝类污染问题。b.建立健

全双壳贝类净化卫生指标,与欧美发达国家卫生指标达到相同水平,建立生食贝类卫生标准,及时更新净化过程中的技术指导规范,以便为中小型企业提供参考。c.加强冷杀菌技术及益生菌制剂在活体贝类净化中的应用研究,开发新型绿色、高效安全的化学净化剂,同时将灭菌海水暂养净化、物理吸附法、化学降解法、生物代谢等多种净化方式有机结合,提高净化效率。d.加强净化设备研发力度,运用现代化传感、自动化、智能化技术搭建一体的贝类净化实时动态监测系统,实现对贝类净化全智能监测与精细化管理。e.深入研究净化过程中贝类能量代谢问题,降低净化造成贝类的主要营养成分损耗,风味品质的变化。f.深入研究阐明污染物在双壳贝类体内蓄积、转化、代谢机制,为保障水产品安全及贝类养殖加工产业发展提供科学支撑。在上述问题不断完善的基础上,双壳贝类净化技术将有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2019. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Fisheries and Fisheries Administration, Nation Fishes Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.]
- [2] MEGHNATH K, HASSELBACK P, MCCORMICK R, et al. Outbreaks of norovirus and acute gastroenteritis associated with British Columbia oysters, 2016-2017[J]. *Food and Environmental Virology*, 2019, 11(2): 138-148.
- [3] 高加龙,章超桦,秦小明,等.不同温度无水保活对香港牡蛎微生物和基本营养成分的影响[J].*广东海洋大学学报*, 2020, 40(5): 90-96. [GAO J L, ZHANG C H, QIN X M, et al. Effects of different temperatures waterless keep alive on total number of bacteria and coliform group, and basic nutritional compositions in *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(5): 90-96.]
- [4] 秦小明,章超桦,林华娟,等.菲律宾蛤仔净化技术初步研究[J].*食品工业科技*, 2008(3): 103-105. [QIN X M, ZHANG C H, LIN H J, et al. Preliminary study on depuration technology of *Ruditapes philippinarum*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008(3): 103-105.]
- [5] 陈嘉文,秦小明,林华娟,等.波纹巴非蛤净化中试研究[J].*现代食品科技*, 2009, 25(7): 764-766. [CHEN J W, QIN X M, LIN H J, et al. Pilot study on the depuration of *Paphia papilionacea*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2009, 25(7): 764-766.]
- [6] OYANEDERTERRAZAS J, CONTRERAS H R, GARCIA C. Prevalence, variability and bioconcentration of saxitoxin-group in different marine species present in the food chain[J]. *Toxins*, 2017, 9(6): 190.
- [7] 翟毓秀,郭萌萌,江艳华,等.贝类产品质量安全风险解析[J].*中国渔业质量与标准*, 2020, 10(4): 1-25. [ZHAI Y X, GUO M M, JIANG Y H, et al. Analysis on the quality and safety risks of

- shellfish products[J]. *China Fisheries Quality and Standards*, 2020, 10(4): 1–25.]
- [8] LI L, WANG S, SHEN X, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in the water of China's coastal shellfish culture areas[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(9): 1–11.
- [9] ÁLVAREZ-MUÑOZ D, RAMBLA-ALEGRE M, CARRASCO N, et al. Fast analysis of relevant contaminants mixture in commercial shellfish[J]. *Talanta*, 2019, 205: 119884.
- [10] MORAISCALADO S L, SANTOS G S, WOJCIECHOWSKI J, et al. The accumulation dynamics, elimination and risk assessment of paralytic shellfish toxins in fish from a water supply reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 3222–3229.
- [11] ORTIZ A, NAVARRO J M, PIZARRO G, et al. Accumulation and biotransformation dynamics of the neurotoxic complex, saxitoxin, in different life stages of *Ostrea chilensis*[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 144: 240–245.
- [12] MARKICH S J. Sensitivity of the glochidia (larvae) of freshwater mussels (Bivalvia: Unionida: Hyriidae) to cadmium, cobalt, copper, lead, nickel and zinc: Differences between metals, species and exposure time[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 1427–1436.
- [13] LI A, MA J, CAO J, et al. Analysis of paralytic shellfish toxins and their metabolites in shellfish from the North Yellow Sea of China[J]. *Food Additives and Contaminants*, 2012, 29(9): 1455–1464.
- [14] 刘世永, 刘俊荣, 马永生, 等. 底播虾夷扇贝活品供应链各环节中肠道菌群分析[J]. *水产科学*, 2014, 33(10): 626–630. [LIU S Y, LIU J R, MA Y S, et al. Intestinal flora in supply chain of live bottom *Patinopecten yessoensis*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 33(10): 626–630.]
- [15] SMOLOWITZ R, DOUCETTE G. Immunohistochemical localization of saxitoxin in the siphon epithelium of the butter clam, *Saxidomus giganteus*[J]. *The Biological Bulletin*, 1995, 189(2): 229–230.
- [16] SHIMADA T. Xenobiotic-metabolizing enzymes involved in activation and detoxification of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*, 2006, 21(4): 257–276.
- [17] 慕翠敏. 太平洋牡蛎中大肠杆菌净化的实验研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(s1): 83–86. [MU C M. Effects of different factors on depuration of *Escherichia coli* from *Crassostrea gigas*[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(s1): 83–86.]
- [18] 田华, 高春蕾, 王宗灵, 等. 麻痹性贝毒在不同贝类组织体外转化的比较[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(3): 382–386. [TIAN H, GAO C L, WANG Z L, et al. Comparison of paralytic shellfish toxins *in vitro* transform by different shellfish tissues[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(3): 382–386.]
- [19] CAO R, WANG D, WEI Q, et al. Integrative biomarker assessment of the influence of saxitoxin on marine bivalves: A comparative study of the two bivalve species oysters, *Crassostrea gigas*, and scallops, *Chlamys farreri*[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018(9): 1173.
- [20] ANDRITSOS N D, MOSCHONAS G, ROUKAS D. Elimination of *Escherichia coli* from mussels during treatment in a shellfish depuration system[C] 2nd International Congress on Applied Ichthyology and Aquatic Environment. Messolonghi: 2016: 10–12.
- [21] POLO D, ÁLVAREZ C, DIEZ J, et al. Viral elimination during commercial depuration of shellfish[J]. *Food Control*, 2014, 43: 206–212.
- [22] AMOROSO M G, LANGELLOTTIA L, MARTELLO A, et al. Quantitative real-time PCR and digital PCR to evaluate residual quantity of HAV in experimentally depurated mussels[J]. *Food and Environmental Virology*, 2021: 1–8.
- [23] 乔庆林, 蔡友琼, 徐捷, 等. 采用臭氧系统净化太平洋牡蛎中的大肠杆菌[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(5): 72–75. [QIAO Q L, CAI Y Q, XU J, et al. A study on ozone system depuration for *E. coli* in Pacific oyster[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2004, 30(5): 72–75.]
- [24] 李国威, 傅润泽, 沈建, 等. 微酸性电解水对活品虾夷扇贝存活率的影响及杀菌效果[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(1): 68–74. [LI G W, FU R Z, SHEN J, et al. The effects of slightly acidic electrolyzed water on the disinfection and survival rate of live *Patinopecten yessoensis*[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(1): 68–74.]
- [25] AL-QADIRI H M, AL-HOLY M A, SHIROODI S G, et al. Effect of acidic electrolyzed water-induced bacterial inhibition and injury in live clam (*Venerupis philippinarum*) and mussel (*Mytilus edulis*)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 231: 48–53.
- [26] WENG S C, DUNKIN N, SCHWAB K J, et al. Infectivity reduction efficacy of UV irradiation and peracetic acid-UV combined treatment on MS2 bacteriophage and murine norovirus in secondary wastewater effluent[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 221: 1–9.
- [27] CHENG G, LI Z, SUN L, et al. Application of microwave/electrodeless discharge ultraviolet/ozone sterilization technology in water reclamation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138: 148–156.
- [28] 林清, 马庆涛, 李春晓, 等. 臭氧-紫外线组合对净化近江牡蛎大肠菌群及细菌总数的灭菌效果[J]. *热带生物学报*, 2017, 8(4): 404–408. [LIN Q, MA Q T, LI C X, et al. Effect of combined ozone-ultraviolet on the total colony count and the coliform group in *Crassostrea rivularis*[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2017, 8(4): 404–408.]
- [29] SHEN X, SU Y C. Application of grape seed extract in depuration for decontaminating *Vibrio parahaemolyticus* in *Crassostrea gigas*[J]. *Food Control*, 2017, 73: 601–605.
- [30] 王浩, 宋文东. 牡蛎壳对重金属的吸附研究[C]. 中国化学会第 26 届学术年会绿色化学分会论文集. 天津: 中国化学会, 2008. [WANG H, SONG W D. Study on the adsorption of heavy metals on oyster shells[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference of the Chinese Chemical Society on Green Chemistry. Tianjin: Chinese Chemical Society, 2008.]

- [31] QIU J, FAN H, LIU T, et al. Application of activated carbon to accelerate detoxification of paralytic shellfish toxins from mussels *Mytilus galloprovincialis* and scallops *Chlamys farreri*[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 402–409.
- [32] GDOURA M, SELLAMI H, KHANNOUS L, et al. Elimination of *Escherichia coli* and *Salmonella* in clam by using zeolite in a station of depuration[J]. *Water Environment Research*, 2017, 89(9): 856–861.
- [33] LI J, SONG X, ZHANG Y, et al. Effect of modified clay on the transition of paralytic shellfish toxins within the bay scallop *Argopecten irradians* and sediments in laboratory trials[J]. *Aquaculture*, 2019, 505: 112–117.
- [34] FIORATI A, GRASSI G, GRAZIANO A, et al. Eco-design of nanostructured cellulose sponges for sea-water decontamination from heavy metal ions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 1–11.
- [35] 王征, 仝壮, 王燕诗, 等. 4种煅烧活化贝壳粉对 Pb^{2+} 的吸附性能研究[J]. 江西师范大学学报, 2019, 43(1): 84–89. [WANG Z, TONG Z, WANG Y S, et al. The adsorption of Pb^{2+} on water by four shell powders[J]. *Journal of Jiangxi Normal University*, 2019, 43(1): 84–89.]
- [36] 李汴生, 黄雅婷, 阮征. 非热杀菌技术在生食水产品中的应用研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(7): 1259–1276. [LI B S, HUANG Y T, RUAN Z. Application of non-thermal sterilization technology in raw ready-to-eat aquatic products[J]. *Journal of Fisheries*, 2021, 45(7): 1259–1276.]
- [37] 张楚妃, 马庆涛, 林清. 近江牡蛎体内重金属的净化技术[J]. 海洋与渔业, 2018(7): 76–77. [ZHANG C F, MA Q T, LIN Q. Depuration technology of heavy metals in oyster[J]. *Ocean and Fisheries*, 2018(7): 76–77.]
- [38] YANG C, LIU Q, MENG X, et al. Depuration of cadmium from *Chlamys farreri* by $ZnSO_4$, EDTA- Na_2 and sodium citrate in short time[J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 1–7.
- [39] NINGRUM E W, SOLIHIN D D, BUTET N A. Mercury depuration effectiveness on green mussel (*Perna viridis* L.) and blood cockle (*Anadara granosa* L.) from Jakarta Bay using ozone, chitosan and hydrodynamic technique[J]. *Earth and Environmental Science*, 2016, 31(1): 012041.
- [40] 程珊珊, 杨锡洪, 章超桦, 等. 壳聚糖对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附作用[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 410–416. [CHENG S S, YANG X H, ZHANG C H, et al. Adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} by chitosan[J]. *Journal of Fisheries*, 2011, 35(3): 410–416.]
- [41] 孙继鹏, 汪东风, 李国云, 等. 壳寡糖钙、镁配合物对栉孔扇贝体内镉的脱除[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(2): 33–37. [SUN J P, WANG D F, LI G Y, et al. The removal of cadmium from *Chlamys farreri* by chitosan oligosaccharide complexes with Ca and Mg[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2010, 40(2): 33–37.]
- [42] ZHANG B, FANG C, XU J, et al. Depuration of cadmium from blue mussel (*Mytilus edulis*) by protein hydrolysate- Fe^{2+} complex: The role of metallothionein[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(11): 2767–2773.
- [43] 房传栋, 张宾, 吕丹丹, 等. 不同脱除剂对暂养紫贻贝体内重金属 Cd^{2+} 的脱除效果[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 44–48. [FANG C D, ZHANG B, LÜ D D, et al. Depuration of cadmium from cultured mussels (*Mytilusedulis*) by different removal reagent[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(7): 44–48.]
- [44] FANG L, WOLMARANS B, KANG M, et al. Application of chitosan microparticles for reduction of *Vibrio* species in seawater and live oysters (*Crassostrea virginica*)[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(2): 640–647.
- [45] XIE W, LIU X, YANG X, et al. Accumulation and depuration of paralytic shellfish poisoning toxins in the oyster *Ostrea rivularis* gould-chitosan facilitates the toxin depuration[J]. *Food Control*, 2013, 30(2): 446–452.
- [46] BUDIAWAN B, ARIF R, ASRINI M W, et al. Effect of depuration treatment and analysis of heavy metals content (Hg and Pb) on green mussels (*Pernaviridis*) culture in Jakarta Bay waters[C]// Proceedings of the Third International Symposium on Progress in Mathematics and Science, 2018: 020074.
- [47] 李学鹏. 重金属在双壳贝类体内的生物富集动力学及净化技术的初步研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2008. [LI X P. Preliminary study on the kinetics of bioconcentration and depuration technology of heavy metals in bivalve[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2008.]
- [48] YANG X, DAI W, SUN H, et al. Arsenic removal from *Pinctada martensii* enzymatic hydrolysate by using Zr(IV)-loaded chelating resin[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 392–396.
- [49] 赵明明, 刘宏星, 马庆涛, 等. 不同处理方法对葡萄牙牡蛎体内菌群净化效果的比较[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 177–180. [ZHAO M M, LIU H X, MA Q T, et al. Comparison of purging effects for *Escherichia coli* in the oyster *Crassostrea angulata* using different methods[J]. *Marine Ocean Bulletin*, 2018, 37(2): 177–180.]
- [50] RONG R, LIN H, WANG J, et al. Reductions of *Vibrio parahaemolyticus* in oysters after bacteriophage application during depuration[J]. *Aquaculture*, 2014, 418: 171–176.
- [51] 叶挺, 赵明明, 郑怀平, 等. 利用大型海藻净化养殖牡蛎体内重金属的研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(31): 160–164. [YE T, ZHAO M M, ZHENG H P, et al. Removing heavy metals in cultured oysters with macroalgae[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(31): 160–164.]
- [52] 姚茹, 黎祖福, 饶科. 牡蛎生态净化技术研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 286–288. [YAO R, LI Z F, RAO K. Research on oyster ecological depuration technology[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(4): 286–288.]
- [53] OLIVEIRA J, CUNHA A, CASTILHO F, et al. Microbial contamination and purification of bivalve shellfish: Crucial aspects in monitoring and future perspectives-a mini-review[J]. *Food Control*, 2011, 22(6): 805–816.
- [54] 祁剑飞, 曾志南, 宁岳, 等. 葡萄牙牡蛎的净化及其低温贮藏研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(5): 36–41. [QI J F, ZENG Z N, NING Y, et al. Depuration and low-temperature storage of portuguese oyster (*Crassostrea angulata*)[J]. *Fisheries Modernization*,

2016, 43(5): 36–41.]

[55] 潘澜澜, 林成新, 张国琛, 等. 净化暂养及低温离水保活运输对虾夷扇贝品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 301–307.

[PAN L L, LIN C X, ZHANG G C, et al. Effects of purification, temporary rearing and low temperature waterless-keeping alive-transportation on quality characteristics of live *Patinopecten yessoensis* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 301–307.]

[56] 陈坚, 柯爱英, 洪小括. 泥蚶与牡蛎净化工艺优化初探[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(1): 132–138. [CHEN J, KE A Y, HONG X K. Preliminary studies of shellfishes (*Tegillarca granosa* and *Ostrea plicatula*) purification technique[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(1): 132–138.]

[57] BRAGA A C, CAMACHO C, MARQUES A, et al. Combined effects of warming and acidification on accumulation and elimination dynamics of paralytic shellfish toxins in mussels *Mytilus galloprovincialis* [J]. *Environmental Research*, 2018, 164: 647–654.

[58] TOPCUOĞLU S, KIRBAŞOĞLU Ç, GÜNGÖR N. Heavy metals in organisms and sediments from Turkish Coast of the Black Sea, 1997–1998 [J]. *Environment International*, 2002, 27(7): 521–526.

[59] LOVE D C, LOVELACE G L, SOBSEY M D. Removal of *Escherichia coli*, *Enterococcus fecalis*, coliphage MS2, poliovirus, and hepatitis a virus from oysters (*Crassostrea virginica*) and hard shell clams (*Mercinaria mercinaria*) by depuration [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 143(3): 211–217.

[60] TAKATA K, TAKATSUJI H, SENO M. Detoxification of the oyster *Crassostrea gigas* contaminated with paralytic shellfish poison (PSP) by cultivation in filtered seawater [J]. *Nsugaf*, 2008, 74(1): 78–80.

[61] 邴晓菲, 吴海燕, 王群, 等. 麻痹性贝类毒素在栉孔扇贝体内的代谢轮廓[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 623–632. [BING

X F, WU H Y, WANG Q, et al. Metabolic profile of paralytic shellfish toxin in scallop *Chlamys farreri* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 623–632.]

[62] WANG X, ZHOU Y, YANG H, et al. Investigation of heavy metals in sediments and *Manila clams Ruditapes philippinarum* from Jiaozhou Bay, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1): 631–643.

[63] RAZAFIMAHEFA R M, LUDWIG-BEGALL L F, THIRY E. Cockles and mussels, alive, alive, oh-the role of bivalve molluscs as transmission vehicles for human norovirus infections [J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2020, 67: 9–25.

[64] POMMEPUY M, CAPRAIS M P, LE SAUX J C, et al. Evaluation of viral shellfish depuration in a semi-professional tank [C]// 4th International Conference on Molluscan Shellfish Safety. Santiago: 2002: 4–8.

[65] PHUVASATE S, CHEN M H, SU Y C. Reductions of *Vibrio parahaemolyticus* in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) by depuration at various temperatures [J]. *Food Microbiology*, 2012, 31(1): 51–56.

[66] FARRELL H, SEEBACHER F, O'CONNOR W, et al. Warm temperature acclimation impacts metabolism of paralytic shellfish toxins from *Alexandrium minutum* in commercial oysters [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3402–3413.

[67] PHUVASATE S, SU Y C. Impact of water salinity and types of oysters on depuration for reducing *Vibrio parahaemolyticus* in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. *Food Control*, 2013, 32(2): 569–573.

[68] JAHROMI S T, POURMOZAFFAR S, RAMESHI H, et al. Evaluation of hemolymph biochemical properties, clearance rate, bacterial microbiota and expression of HSP genes of gulf pearl oyster *Pinctada radiata* in response to salinity changes [J]. *Fisheries Science*, 2020: 1–11.