

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241015001

引用格式: 宣晓婷, 王铎雷, 张子怡, 等. 缢蛏净化与保活技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 263–270.

XUAN XT, WANG DL, ZHANG ZY, *et al.* Research progress of purification and life preservation technology of *Sinovovacula constricta* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 263–270. (in Chinese with English abstract).

缢蛏净化与保活技术研究进展

宣晓婷¹, 王铎雷², 张子怡³, 尚海涛¹, 林旭东¹, 崔燕¹, 朱麟^{1*}

[1. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 宁波 315100; 2. 宁波市宁海县长街镇人民政府, 宁波 315601; 3. 浙江药科职业大学食品学院, 宁波 315500]

摘要: 在我国沿海滩涂养殖的经济贝类中, 缢蛏占据重要地位。近年来, 由于我国城市化和工业化发展迅速, 海洋污染威胁缢蛏的生存环境, 受污染的缢蛏会在体内蓄积毒素, 由食物链传导, 最终危害人体健康, 所以缢蛏的食品安全问题受到广泛关注。随着交通运输网的不断完善和保活技术体系逐渐成熟, 越来越多的缢蛏被送往内陆地区, 消费市场扩大。因此, 缢蛏在进入流通环节前必须进行净化处理。随着消费者对鲜活缢蛏口感品质的要求不断提高, 缢蛏的净化和保活环节显得尤为重要。本文综述了当前国内缢蛏的净化方式、不同净化工艺的优势和局限性、环境参数对净化的影响、保活技术等方面的研究进展, 为深入开展缢蛏净化与保活技术相关研究提供参考。

关键词: 缢蛏; 净化; 保活技术

Research progress of purification and life preservation technology of *Sinovovacula constricta*

XUAN Xiao-Ting¹, WANG Duo-Lei², ZHANG Zi-Yi³, SHANG Hai-Tao¹,
LIN Xu-Dong¹, CUI Yan¹, ZHU Lin^{1*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315100, China;
2. Changjie Town Government, Ninghai County, Ningbo 315601, China; 3. College of Food Science and Technology,
Zhejiang Pharmaceutical University, Ningbo 315500, China)

ABSTRACT: In the economic shellfish farming on coastal mudflats in China, the *Sinovovacula constricta* occupies an important position. In recent years, due to the rapid urbanization and industrialization in China, marine pollution has threatened the living environment of *Sinovovacula constricta*. Polluted *Sinovovacula constricta* can accumulate toxins in their bodies, which can be transmitted through the food chain and ultimately endanger human health. Therefore, the food safety issue of *Sinovovacula constricta* has received widespread attention. With the continuous improvement of the transportation network and the gradual maturity of the live-keeping technology system, more and more *Sinovovacula constricta* are being sent to inland areas, expanding the consumer market. Therefore,

收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 宁波市农业科学研究院院长基金项目(2024NKYP005); 宁波市公益类科技计划项目(2022S153)

第一作者: 宣晓婷(1991—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为微生物控制与非热加工。E-mail: xuanxiaoting163@163.com

*通信作者: 朱麟(1984—), 男, 研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与保鲜。E-mail: zhulin0822@163.com

Sinovovacula constricta must undergo purification treatment before entering the circulation process. As consumers' demands for the taste and quality of fresh *Sinovovacula constricta* continue to increase, the purification and live-keeping processes of *Sinovovacula constricta* have become particularly important. This article reviewed the current research progress in the purification methods of *Sinovovacula constricta* in China, the advantages and limitations of different purification processes, the influences of environmental parameters on purification, and live-keeping technologies, providing a reference for in-depth research on the purification and live-keeping technologies of *Sinovovacula constricta*.

KEY WORDS: *Sinovovacula constricta*; purification; life preservation technology

0 引言

缢蛏(*Sinovovacula constricta*)是我国南北沿海滩涂地区养殖的主要经济贝类^[1]。由于缢蛏肉质鲜美,营养价值高,富含丰富的不饱和脂肪酸、氨基酸和脂质等营养成分,深受消费者的喜爱^[2],所以我国缢蛏年产量超 80 万 t,具有极高的经济价值^[3]。近年来,随着我国城市化和工业化快速发展,养殖产业迅速增长,导致海域污染日益严重,对缢蛏的养殖环境构成威胁。由于缢蛏属于滤食性生物且迁移能力差,其生存环境一旦受到污染,污染物不仅会附着在体表,还会通过呼吸和摄食活动进入缢蛏体内蓄积形成生物毒素,最终通过食物链危害人体健康^[4]。因此,缢蛏净化是降低致病风险的关键环节。目前,关于缢蛏的净化技术可归纳为海水暂养净化法、水体消毒灭菌法、化学试剂脱除法 and 生物代谢法等,不同的净化技术均有各自的优点和局限性^[5]。

由于缢蛏死亡后,会滋生细菌,导致缢蛏腐败变质;同时不饱和脂肪酸氧化酸败,蛋白质变质产生胺类物质,均会危害人体健康。所以通常采用保活配送的方式来保障在流通环节中缢蛏的风味和品质^[6]。不同的保活方式,对缢蛏的保活效果不同。保活过程中的温度、盐度、溶氧、pH、二氧化碳浓度、浊度等关键因子的变化,也会引起缢蛏风味和品质的变化^[7]。现今,常用的保活技术有化学保活法、模拟生态环境保活法、低温保活法和生态冰温保活法等^[8]。

1 缢蛏净化技术

1.1 缢蛏净化方式

缢蛏净化是将其放在合适盐度的干净盐水或海水中,通过其正常的摄食活动以减少体内的砂石等污染物,起到净化体内生物、化学和物理等危害物的效果^[4]。贝类常见的净化模式有暂养净化、流水净化和循环水净化。针对于缢蛏净化,最常用的方式是暂养净化。缢蛏在经过干净海水暂养和净化,可以降低大肠埃希氏菌和菌落总数的数量,而且随着时间的延长,其大肠埃希氏菌数量由

11000 MPN/g 降低至 30 MPN/g,符合相关标准^[9]。虽然通过暂养净化可以显著降低缢蛏体内致病菌等污染物至可安全食用水平,但由于耗时长(一般净化 24~48 h)、费劳力、经济效益水平不高,且存在因暂养导致缢蛏品质下降、污染其他水体等潜在风险^[10]。

1.2 缢蛏净化工艺

缢蛏净化工艺主要针对泥沙去除、减菌、重金属去除、贝类毒素、有机污染物去除、改善肉内口感品质等方面开展。泥沙去除是缢蛏净化工艺最易实现的目标,可在较短时间内完成,如在适宜盐度的海水或盐水中,通过正常生理活动会将体内的泥沙尽数排出,通常缢蛏吐沙净化在 10 h 内均可完成^[11]。

微生物去除净化是目前净化工艺升级的重点方向,其是利用消毒杀菌后的洁净水体养殖缢蛏,通过缢蛏自身的呼吸和摄食活动将细菌排出体外。当前使用较多的水体消毒工艺包括紫外线、氯制剂、臭氧等技术。紫外线水体净化可显著降低大肠杆菌和副溶血性弧菌的含量,同时对海水中的病毒也有较好的杀灭效果^[12]。氯制剂由于其强氧化性和杀菌效率高被广泛应用于净化水、饮用水的杀菌。氯制剂的类型也由二氧化氯、次氯酸等逐渐发展出含氯电解水。有研究报道,30 mg/L 的电解水可显著降低贝类体内的副溶血性弧菌和创伤弧菌^[13],但过高浓度的电解水会导致贝类的死亡。臭氧技术因其广谱、便捷、杀菌效果良好等优势而应用于海水净化,50 mg/L 的臭氧净化海水 44 h 后可分别降低大肠杆菌、霍乱弧菌和副溶血弧菌 99.8%、90%和 85.1%^[14],但臭氧浓度过高(大于 0.5 mg/L)会对缢蛏产生毒性。单一的杀菌净化手段具有局限性,多组合的杀菌净化技术可以实现快速且显著的杀菌效果,如臭氧结合紫外线杀菌可促使水体中产生氧化性极强的羟基自由基而达到高效杀菌,缩短杀菌时间 75%^[15];而紫外线与氯制剂联合可完全去除贝类中的染伤寒沙门氏菌^[16]。

重金属是缢蛏净化工艺中较难去除的一种污染物。缢蛏出现重金属富集,主要富集于消化腺。由于短时间暂养,缢蛏经自身代谢无法排尽重金属,通常通过脱除剂进行脱离,包括乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid,

EDTA)类、壳聚糖类、硒化物类、微生物制剂等。研究表明,通过 EDTA 净化的贻贝,镉去除率可达到 40%以上^[17];壳聚糖联合海藻可以降低牡蛎体中的镉和铅至符合国家标准^[18];硒化卡拉胶可净化贻贝体内的镉,脱除率达 38%^[17]。不同的重金属脱除方式不尽相同,主要受到金属元素的生物半衰期影响,因此需要有针对性的评估缢蛏体内的重金属类型,筛选适宜、高效的脱除手段。

贝类毒素是贝类摄食有毒藻类后,在其内脏团和消化腺中蓄积形成的一类有毒化合物,该毒素会经食物链传递引起人中毒。因此在缢蛏净化工艺中,去除贝类毒素至关重要。活体贝类可通过贝类净化工艺降低体内的毒素含量。有学者研究发现,采用紫外循环消毒水净化人工感染脱氨甲酰基新石房蛤毒素(decarbamoylneosaxitoxin, dcNEO)的紫贻贝,净化 10 d 后,脱除率达 57.8%^[19];通过臭氧消毒水联合饵料投喂的净化模式净化人工感染麻痹性贝毒(paralytic shellfish poisoning, PSP)的文蛤,净化 15 d 后,脱除率达 47.2%^[20];向海水中添加 0.05 g/L 壳聚糖,净化 7 d,可使近江牡蛎中的 PSP 降至 1.41 MU/g^[21]。贝类毒素去除难度大,净化成本高且净化方法存在局限性。因此,选择安全无污染的海域进行养殖生产,同时严格把关安全检

测,是获得无毒贝类的最优方法。

缢蛏净化工艺以及优缺点见表 1。

1.3 缢蛏净化环境参数

缢蛏净化速率与环境参数密切相关。缢蛏的最适生长环境条件与其净化速率最快的环境参数并不相符。根据去除目标污染物的不同,选择最优的环境参数来提高缢蛏的净化效率。为达到这一目的,往往选择人工可调控的环境参数,比如饵料、温度、盐度和水流速度等。

温度是影响缢蛏净化速率的重要环境因素。有研究表明,适宜的净化温度有助于去除贝类中的微生物。以牡蛎的微生物去除净化为例,在去除病毒的过程中,当暂养水温度超过 20 ℃时,3~4 d 即可下降一个对数值^[22]。在去除细菌的过程中,将暂养水温度控制在 7~15 ℃内,净化 5 d 后,长牡蛎中的副溶血性弧菌数减少 3 个对数值,牡蛎死亡率为 0^[23]。明显可见,净化温度偏低有利于去除贝类中的细菌,而净化温度偏高有利于去除贝类中的病毒。另外,当暂养水温度过高时,会对缢蛏的生命活动构成威胁;当暂养水温度过低时,缢蛏呼吸代谢活动降低,抗氧化能力下降,都会使净化速率减缓。因此,在缢蛏净化时,需根据要去除的目标污染物来选择合适的净化温度,以加快净化速率。

表 1 缢蛏净化工艺以及优缺点
Table 1 Purification process of *Sinovacuola constricta* and its advantages and disadvantages

目标污染物	原理	条件	优点	缺点
泥沙	在适宜盐度的海水或盐水中,缢蛏通过正常生理活动,排出体内的泥沙	根据缢蛏生长的海域环境选择合适的盐度,缢蛏通常在十小时内完成吐沙净化 ^[11]	方法简单,节约能源;不使用化学剂,生态性	耗时长,经济效益低
微生物	利用消毒杀菌后的洁净水体养殖缢蛏,通过缢蛏自身的呼吸和摄食活动将细菌排出体外	包括紫外线、氯制剂、臭氧。例如,紫外线杀菌可显著降低贝类中大肠杆菌和副溶血性弧菌的含量 ^[12] ;30 mg/L 的电解水可显著降低贝类体内的副溶血性弧菌和创伤弧菌 ^[13] ;紫外线与氯制剂联合可完全去除贝类中的染伤寒沙门氏菌 ^[16]	杀菌效果好,低残留,可持续工作,不破坏营养物质	不适用于受深度污染的贝类净化中,杀菌范围有限
重金属	向洁净水体中添加化学脱除剂,使缢蛏摄食后能起拮抗或吸附作用,加快重金属排出	包括 EDTA 类、壳聚糖类、硒化物类、微生物制剂。例如,通过 EDTA 净化的贻贝,镉去除率可达到 40%以上 ^[17] ;壳聚糖联合海藻可以降低牡蛎体中的镉和铅至符合国家标准 ^[18] ;硒化卡拉胶可净化贻贝体内的镉,脱除率达 38% ^[17]	在一定程度上能有效脱除贝类中的重金属	使用化学试剂,容易产生化学残留,易对贝类的生理代谢活动造成影响
贝类毒素	采用一种或两种以上的组合净化模式,降低受污染的缢蛏体内的毒素含量	臭氧消毒水联合饵料投喂的净化模式净化人工感染 PSP 的文蛤,净化 15 d 后,脱除率达 47.2% ^[20] ;向海水中添加 0.05 g/L 壳聚糖,净化 7 d,可使近江牡蛎中的 PSP 降至 1.41 MU/g ^[21]	多种净化方式组合,杀菌范围广,能降低贝毒素,安全性提高	无法彻底去除贝毒素,净化成本高,耗时长
有机物污染	通过化学反应,使污染物发生降解和转化,直至形成可稳定而无毒的物质	相比于自来水清洗,电解水清洗可实现农药(毒死蜱)去除率提高了 35.8%	能实现有机物污染一定程度的降解,安全性高	对品质有一定影响,无法彻底去除有机物污染

盐度是贝类生存环境中必不可少的要素之一。暂养水中的盐度高低所引起水中渗透压的变化会直接影响贝类的摄食代谢活动。有学者研究发现, 贝类的净化过程受到盐度的影响。例如, 在净化去除长牡蛎中的副溶血性弧菌时, 盐度为 10 的净化效果要劣于盐度为 20~30 的净化效果^[24]; 当盐度低于 7.4 时, 牡蛎的摄食活动缓慢下降甚至暂停^[25-26]。在净化去除缢蛏中的泥沙时, 设置盐度范围为 10~35。在盐度为 10 时, 出现其吐沙率的最小值为 35.1%。当盐度升高至 25 时, 缢蛏吐沙率达到最大值为 50.6%, 净化 4 h 后, 盐度为 25 的缢蛏吐沙率达到 92.4%^[27]。可见, 在相同时间内, 当盐度偏低, 会抑制缢蛏摄食代谢活动, 延长净化时间。

水流速度对缢蛏净化有间接影响。在净化过程中, 缢蛏会通过其呼吸代谢和摄食活动将体内污染物排出。若不及时处理这些排泄物, 那么排泄物中包含的泥沙、微生物和重金属等污染物可能会对缢蛏构成二次污染。当水流速度过小时, 暂养水体易缺氧导致缢蛏摄食代谢行为减弱, 降低净化效率; 当水流速度过大会冲击已沉淀的排泄物, 使水体浑浊, 影响杀菌效果^[28]。因此, 在选择水流速度时, 需要考虑缢蛏的呼吸代谢和摄食活动, 有利于缢蛏排污最大化并完成暂养水体的消毒, 达到净化的要求。

选择合适的饵料种类可以加快缢蛏的净化速率。比如在去除泥沙环节中, 向循环水系统或者流水净化设施内, 按蛏料比与一定的时间间隔, 分批投喂扁藻、小球藻、金藻和三角褐指藻等藻类饲料, 基本可以在十小时内, 完成

去除泥沙的净化过程^[11,25]; 优质的浮游生物饵料可以促进缢蛏滤食活动, 提高其净化效率; 人工饵料的营养更加均衡, 可根据缢蛏自身特性制定适宜的营养成分的配比。饵料的质量, 包括新鲜度、营养成分配比、颗粒粗细等因素都对缢蛏的净化塑料厂有一定的影响。

不同的堆放方式也会影响缢蛏的净化效果。采用单层堆放方式, 缢蛏可充分接触净化水, 有利于呼吸代谢活动的进行, 从而提高净化效果。此外, 单存堆放可以更好地观察缢蛏的形态, 及时发现和处理异常情况。缺点是单存堆放所占空间较大, 在实际生产利用时易受空间的限制。多层堆积方式可以节省空间, 提高场地利用率, 但可能会导致部分缢蛏不能与净化水充分接触, 失水死亡, 或者存放在底层的缢蛏会受到挤压作用, 导致贝体破裂死亡。因此, 选择合适的堆放密度对缢蛏的净化有关键作用。环境参数对缢蛏净化的影响见表 2。

2 缢蛏保活技术

缢蛏产区主要集中在沿海地区, 保活配送是其产业拓展、农业增效的必由之路。目前贝类的保活技术已逐渐形成体系, 众多学者围绕保活技术与品质维持等方面做了大量的基础性研究, 主要包括化学保活法、模拟生态环境保活法、低温保活法等。不论哪种方法, 缢蛏保活技术必须要考虑到温度、盐度、溶氧、pH、氨氮、污染物等关键环境因子的影响。

表 2 环境参数对缢蛏净化的影响
Table 2 Influence of environmental parameters on the purification of *Sinovovacula constricta*

环境参数	原理	影响	参考文献
温度	通过调节暂养水的水温, 以控制贝类的呼吸代谢活动, 从而加快微生物净化过程	净化温度偏低有利于去除贝类中的细菌, 而净化温度偏高有利于去除贝类中的病毒 例: 在去除病毒的过程中, 当暂养水温度超过 20 °C 时, 3~4 d 即可下降一个对数值。在去除细菌的过程中, 将暂养水温度控制在 7~15 °C 内, 净化 5 d 后, 长牡蛎中的副溶血性弧菌数减少 3 个对数值, 牡蛎死亡率为 0	[22-23]
堆放方式	通过改良堆放方式, 可提高贝类的呼吸代谢活动, 进而加快净化进程	单层堆放对贝类品质的影响小于多层堆放, 单层堆放方式可保证贝类充分接触净化水, 有利于呼吸代谢活动的进行, 从而提高净化效果, 但不利于空间利用。因此采用错位堆放	[22]
盐度	根据不同贝类的耐盐性, 选择合适的盐度可提高提贝类的吐沙率	盐度在 20~30 之间时, 去除长牡蛎中的副溶血性弧菌效果最好; 盐度为 25 时。缢蛏吐沙率达到最大值	[24,27]
饵料	投喂藻类饲料, 加快贝类的摄食代谢活动, 从而达到去除泥沙的目的	投喂扁藻、小球藻、金藻和三角褐指藻等藻类饲料, 基本可以在十小时内, 完成去除泥沙的净化过程	[11,25]
水流速度	控制水流速度, 以降低排出物对缢蛏构成二次污染的风险	当水流速度过小时, 暂养水体易缺氧导致缢蛏摄食代谢行为减弱, 降低净化效率; 当水流速度过大会冲击已沉淀的排泄物, 使水体浑浊, 影响杀菌效果	[28]

2.1 化学保活法

化学保活法是通过某些化学药物的作用或麻醉作用使得缢蛏进入休眠或麻醉状态,以降低其对环境胁迫的应激反应,从而降低其代谢功能与呼吸强度,以提高运输保活效率。麻醉技术分为物理麻醉和化学麻醉,化学麻醉包括丁香类、笑气、间氨基苯甲酸乙酯甲基磺酸盐(tricaine methanesulfonate, MS-222)等^[29],其主要弊端是化学药物可能在机体内富集进而影响人体健康,因此化学麻醉具有较多安全隐患。随着技术的不断发展,后续出现了一些低毒或无毒麻醉剂(如二氧化碳、丁香酚油等)应用于保活中。徐德峰等^[30]用 150 mg/L 丁香酚成功麻醉凡纳滨对虾,李宁等^[31]证实了丁香酚对黑鲈鱼的应激程度较低,周翠平^[32]用 0.6 mg/L 二氧化碳浸泡罗非鱼后无水保活时间延长至 5 h。目前虽然麻醉技术在鱼类、虾类等水产品品类中有研究报道,但鲜少将其应用于贝类保活运输。物理麻醉包括低温冷冻法和电击法。低温冷冻法的原理是通过降低水温,并使用冰水混合物使鱼类减缓呼吸代谢活动,进入昏迷状态。而电击法则是刺激鱼类的神经中枢系统使鱼类休克,便于长途运输。物理麻醉法不会在鱼体内残留有害物质,因此相对安全,但需要精准把控麻醉时间和操作条件,避免鱼类产生过强的应激反应,损伤鱼体。

2.2 模拟生态环境保活法

模拟生态环境保活法是根据贝类的自然生长环境进行模拟运输,主要调控的环境参数包括温度、湿度、盐度、溶解氧、pH 等。目前缢蛏最为常见的模拟生态环境保活的方式是保留部分滩涂泥以延长其保活时间,但由于滩涂泥不便于运输且易污染包装而存在局限性。有学者通过模拟海湾扇贝的生活温度、湿度和氧气进行无水保活^[33],又或是通过控制水流动性、饵料和水温等因素模拟魁蚶的生长环境条件^[34]。模拟生态环境保活技术的关键在于必须依据缢蛏原生环境参数建立生存模型,并在保活运输过程中控制好关键环境参数,因此其运输成本大大提高。

2.3 低温保活法

低温保活法分为低温有水保活与低温无水保活,其中低温无水保活是缢蛏主流的保活方式,可以有效提高水产品的运载量。温度作为缢蛏保活重要的环境因素,与其代谢功能、抗氧化能力等密切相关。温度的波动会直接影响缢蛏机体的耗氧量增加,造成体内自由基代谢紊乱并大量积累,进而损伤了机体的生理机能与免疫能力。有学者对比缢蛏在不同温度条件下 (-4 ± 1) 、 (0 ± 1) 、 (5 ± 1) 、 (10 ± 1) 、 (25 ± 1) °C 贮藏的存活率与品质影响,研究结果表明 0 °C 环境下缢蛏的保活效果最好,其失重率和开壳率较低,同时带沙组、控湿组的保活效果优于清洗组、不控湿组^[35]。方佳琪等^[36]证实相较于 10~15 °C 条件,4 °C 环境能够更好的诱导缢蛏机体超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和还原性谷胱甘肽

(glutathione, GSH)活性增加,以抑制丙二醛和 H_2O_2 含量,同时减缓糖原的消耗与乳酸的积累。类似的结论也在牡蛎、扇贝、蛤仔等的保活研究中发现^[37-39]。但胡远辉等^[40]发现净化清洗的缢蛏在无水低温保活下活性更佳,应该是低温降低了缢蛏的新陈代谢。不同的降温方式会极大的影响缢蛏保活效果,梯度降温 and 线性降温均比直接降温的方式更有利于缢蛏的保活效果,缓解低温胁迫导致的氧化应激^[41]。缢蛏不同组织部位对温度胁迫的响应是存在差异性的,相比于外套膜和鳃,缢蛏消化腺在温度胁迫下维持了较高水平的 SOD、CAT、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPX)、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)活性和 GSH 含量,具有更好的抗氧化损伤能力,说明消化腺能较好地代表缢蛏集体的抗氧化能力的组织部位^[42]。

2.4 生态冰温保活法

生态冰温保活法是通过低温诱导使得贝类进入半休眠或者完全休眠状态,降低呼吸代谢强度同时维持生命体所必须的生存条件,减少或避免贝类在运输过程中因环境温度骤变而导致其代谢功能紊乱,造成贝体应激胁迫损伤,以达到保活效果^[43]。针对贝类保活过程,常用的降温方式有 3 种,分别是直接降温、均匀降温和梯度降温。有学者研究发现,降温速率快慢与代谢功能紊乱密切相关。梯度降温相较于其他两者,更能显著降低贝类由于温度变化而导致应激胁迫损伤的发生率,极大地减少温度变化所带来的不良反应,延长贝类的保活时间,从而提高经济效益^[44]。该项技术最早来源于日本学者,其关键控制点是始终保持生命体处于生态冰温温度区。生态冰温温度区是指从冻结点到能够区分生死的临界温度之间的范围,且不同生命体的生态冰温温度区域是不相同的。例如,皱纹盘鲍的生态冰温区为 $-1.5\sim 0$ °C^[45];太平洋牡蛎生态冰温区为 $-1.7\sim 0$ °C^[46];毛蚶生态冰温区为 $-1.6\sim 0$ °C^[47],目前,利用生态冰温技术,已在牡蛎、扇贝、贻贝、蛤仔、鲍鱼等贝类中得以实现。倪锦等^[45]利用冷海水喷淋结合充氧与生态冰温保存,显著提高了皱纹盘鲍的存活率。高加龙等^[48]利用生态冰温技术使得香港牡蛎保活 9 d 且存活率达 90% 以上。因此在开展缢蛏生态冰温保活前需要根据缢蛏在不同温度下的活动状况和呼吸频率,将缢蛏开始出现无规律的呼吸频率,同时观察不到腮的呼吸运动,且缢蛏尚未死亡时的温度,作为缢蛏的临界温度;根据缢蛏在 0 °C 以下,体内组织细胞水分开始冻结时的温度,作为缢蛏的冻结点。最后根据冻结点到临界温度的范围来确定其生态冰温区。近年来,随着贝类的营养价值被不断挖掘,电商消费的不断发展和消费者对生鲜水产品品质的要求不断提高,市场对贝类的需求量正在逐渐增加。生态冰温技术因其可避免在运输环节中由于水体变质、温度骤变等因素导致贝类品质恶化以及优化传统运输方式运输不便等优势,将成为未来贝类运输的主流技术。

缢蛏保活技术以及优缺点见表 3。

表 3 缢蛏保活技术以及优缺点
Table 3 Life preservation technology of *Sinonovacula constricta* and its advantages and disadvantages

保活方法	原理	条件	优点	缺点
化学保活法	通过化学药物的作用或麻醉作用使得缢蛏进入休眠或麻醉状态,降低其代谢功能与呼吸强度 ^[29]	包括丁香类、笑气、MS-222、丁香酚。 例如,丁香酚对松江鲈的有效麻醉浓度为 20~80 mg/L ^[49] ;低浓度(10 mg/L) MS-222 对大黄鱼可以达到最佳效果,将运输时长增至 12 h ^[50]	使用方便,运输保活效率高,应用范围广	化学药物残留影响人体健康
模拟生态环境保活法	根据贝类的自然生长环境进行模拟运输、包括温度、湿度、盐度、溶解氧、pH ^[34]	保留部分滩涂泥延长其保活时间,模拟缢蛏的生活温度、湿度和氧气进行无水保活 ^[33] ,又或是通过控制水流动性、饵料和水温等因素模拟生长环境条件	生态性、更贴近生存环境,存活质量高	运输成本大,容易产生包装污染
低温保活法	利用加冰或利用冷冻设备,以一定的降温速率,将缢蛏的温度进行下降,来降低其新陈代谢速率,进而对其进行保活的方法 ^[36]	净化清洗的缢蛏在无水低温保活下活性更佳,4℃下缢蛏的存活率最高,在保活第 7 d 时存活率仍高达 84%,保活效果最好 ^[36]	简单操作,提高运载量,保活运输时间长	温度波动不可控且成本高
生态冰温保活法	通过低温诱导使得缢蛏进入半休眠或者完全休眠状态,降低呼吸代谢强度同时维持生命体所必须的生存条件 ^[43]	生活在北方领域临界温度在 0℃左右,而较暖水域临界温度 0℃以上。一般选择保活温度在 0~4℃ ^[44,46]	最大限度地提高了保活运输时间,品质的新鲜保障高	运输技术要求高,温度控制要求高

3 结束语

缢蛏作为我国独特的双贝类软体动物,其独特风味与丰富营养,深受消费者喜爱。随着海域环境风险的不断提升以及电商消费模式的转变,缢蛏的安全与运输保活问题越来越受关注。我国缢蛏净化与保活技术起步较晚,没有体系化的净化与保活工艺且其工艺参数缺乏量化依据。因此需要重点开展以下几方面的基础性研究:(1)构建兼顾风味保持与品质提升的体系化净化工艺研究。缢蛏净化期间所使用的净化海水、投喂的饵料均会影响其净化后的风味与品质,探究净化方式与工艺对缢蛏风味与品质的影响,构建兼顾风味保持与品质提升新型净化技术是目前产业的迫切需求点;(2)缢蛏快递物流保活技术标准化。随着电商与互联网+的不断发展,缢蛏快递物流保活技术需求迫切,虽然目前缢蛏低温无水保活的研究已逐步开展,但适应于不同运输条件、环境与距离的保活技术有待进一步细化探究,同时应建立以市场需求为导向的标准化缢蛏物流保活工艺。(3)开展缢蛏生物毒素的净化研究。受生物毒素污染的缢蛏无法用肉眼直接判断,常规的烹调加工方式也无法彻底破坏生物毒素。目前对缢蛏中生物毒素去除的净化研究有待更深一步的探究。因此,迫切需要开展相关研究,建立有效的贝类食品安全控制法。

参考文献

[1] 王涛,刘雨博,佟长青,等. 缢蛏多糖提取工艺优化及生物活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1618–1626.

WANG T, LIU YB, TONG CQ, *et al.* Study on extraction process optimization and bioactivity of *Sinonovacula constricta* polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1618–1626.

[2] 孙秋颖, 张付云, 李伟, 等. 缢蛏的营养及活性成分研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(12): 201–204.

SUN QY, ZHANG FY, LI W, *et al.* Research progress on the nutritional and functional ingredient of *Sinonovacula constricta* (Lamarck) [J]. Food Research and Development, 2011, 32(12): 201–204.

[3] 吴雪萍, 韦熊刚, 韦美椿, 等. 我国沿海 8 个地理群体缢蛏的表型性状对质量性状的影响[J]. 广西科学, 2022, 29(3): 566–576.

WU XP, WEI XG, WEI MC, *et al.* Effects of phenotypic traits on *Sinonovacula constricta* in 8 coastal geographic populations of China [J]. Guangxi Science, 2022, 29(3): 566–576.

[4] 邱天龙, 陈文超, 祁剑飞, 等. 贝类净化技术研究现状与展望[J]. 海洋科学, 2021, 45(3): 134–142.

QIU TL, CHEN WC, QI JF, *et al.* Research status and prospects of shellfish depuration technology [J]. Marine Science, 2021, 45(3): 134–142.

[5] 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.

LIN HZ, GAO JL, FAN XP, *et al.* Research progress on depuration technology of bivalves [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 449–457.

[6] 杨婷婷, 刘俊荣, 俞微微, 等. 活品流通过程中虾夷扇贝风味品质的变化[J]. 水产学报, 2015, 39(1): 136–146.

YANG TT, LIU JR, YU WW, *et al.* Flavor attributes of scallop *Patinoptecten yessoensis* along the live supply chain [J]. Aquaculture and Fisheries, 2015, 39(1): 136–146.

[7] 申淑琦, 王玉美, 王小瑞. 海湾扇贝低温无水保活过程中营养成分和生化特性的变化[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(6): 633–637.

- SHEN SQ, WAN YM, WANG XR. Changes in nutrient composition and biochemical characteristics of bay scallop *Argopecten irradians* during keep-alive under free water at low temperature [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(6): 633–637.
- [8] 欧阳杰, 陈文秀, 沈建. 贝类保活流通技术研究现状与展望[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(5): 44–49.
- OUYANG J, CHENG WX, SHEN J. Current status and prospect of research on shellfish keeping alive distribution technology [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(5): 44–49.
- [9] 鲍静姣, 郭远明, 金雷, 等. 受污染缢蛏大肠埃希氏菌的净化研究[J]. 广州化工, 2014, 42(16): 65–66, 121.
- BAO JJ, GUO YM, JIN L, *et al.* The purification of polluted *Sinonovacula constricta* *Escherichia coli* [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(16): 65–66, 121.
- [10] LEE R, LOVATELLI A, ABABOUC L. Bivalve depuration: Fundamental and practical aspects [M]. Rome: Food and Agriculture Organization United Nations, 2008.
- [11] 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 AIY, HONG XK. Preliminary studies of shellfishes (*Tegillarca granosa* and *Ostrea plicatula*) purification technique [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(1): 132–138.
- [12] PHUVASATE S, CHEN MH, SU YC. Reductions of *Vibrio parahaemolyticus* in pacific oysters (*Crassostrea gigas*) by depuration at various temperatures [J]. Food Microbiology, 2012, 31(1): 51–56.
- [13] REN T, SU YC. Effects of electrolyzed oxidizing water treatment on reducing *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus* in raw oysters [J]. Journal of Food Protection, 2006, 69(8): 1829–1834.
- [14] CROCI L, SUFFREDINI E, COZZI L, *et al.* Effects of depuration of molluscs experimentally contaminated with *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* O1 and *Vibrio parahaemolyticus* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2002, 92(3): 460–465.
- [15] 王艳, 周培根, 徐文达, 等. 臭氧-紫外组合法净化贝类研究[J]. 水产科学, 2004(5): 31–33.
- WANG Y, ZHOU PG, XU WD, *et al.* Shellfish depuration by integrated O₃-UV method [J]. Fisheries Science, 2004(5): 31–33.
- [16] DEABREU-CORRÊA A, ALBARNAZ JD, MORESCO V, *et al.* Depuration dynamics of oysters (*Crassostrea gigas*) artificially contaminated by *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* [J]. Marine Environmental Research, 2007, 63(5): 479–489.
- [17] 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 Cd²⁺ 的脱除效果[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 44–48.
- FANG CD, ZHANG B, LV DD, *et al.* Depuration of cadmium from cultured mussels (*Mytilus edulis*) by different removal reagents [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 44–48.
- [18] 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 MM, ZHENG HP, *et al.* Removing heavy metals in Cultured oysters with macroalg [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(31): 160–164.
- [19] BRAGA AC, 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.
- [20] 沈和定, 付金花, 冉福. 麻痹性贝毒在文蛤体内的累积及净化技术研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(7): 45–50.
- SHEN HD, FU JH, RAN F. Accumulation and detoxification of paralytic shellfish poison (PSP) in hard clam *Meretrix meretrix* [J]. Marine Science, 2011, 35(7): 45–50.
- [21] XIE WC, LIU XL, YANG XH, *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.
- [22] POMMEPUY M, CAPRAIS MP, SAUX JCL, *et al.* Evaluation of viral shellfish depuration in a semi-professional tank [J]. 4th International Conference on Molluscan Shellfish Safety, 2003, 485–499.
- [23] PHUVASATE S, CHEN MH, SU YC. Reductions of *Vibrio parahaemolyticus* in Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) by depuration at various temperatures [J]. Food Microbiology, 2012, 31(1): 51–56.
- [24] PHUVASATE S, SU YC. 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.
- [25] SCHNEIDER KR, CEVALLOS J, RODRICK GE. Shellfish safety and quality [M]. North America: Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2009.
- [26] SU YC, LIU CC. Seafood processing: Technology, quality and safety [M]. John Wiley and Sons, Ltd, UK: John Wiley and Sons, Ltd, 2014.
- [27] 水柏年. 若干环境因子对缢蛏 *Sinonovacula constricta* (Lamarck)快速净化的影响研究[J]. 现代渔业信息, 2007(9): 6–10.
- SHUI BN. A study on effect of several environmental factors on quick purification of *Sinonovacula constricta* (Lamarck) [J]. Modern Fisheries Information, 2007, (9): 6–10.
- [28] LEE R, LOVATELLI A, ABABOUC L. Bivalve depuration: fundamental and practical aspects [M]. Rome: Food and Agriculture Organization United Nations, 2008.
- [29] PIRHONEN J, SCHRECK CB. Effects of anesthesia with MS-222, clove oil and CO₂ on feed intake and plasma cortisol in steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4): 507–514.
- [30] 徐德峰, 吴嘉鑫, 孙力军, 等. 丁香酚和 MS-222 对凡纳滨对虾麻醉效果比较[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 44–52.
- XU DF, WU JX, SUN LJ, *et al.* Comparison on anesthetic efficacy of eugenol and MS-222 on *Shrimplitopenaeus vannamei* [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(5): 44–52.
- [31] 李宁, 白婵, 熊光权, 等. 丁香酚和三卡因甲磺酸盐在大口黑鲈中代谢残留的比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 56–64, 71.
- LI N, BAI C, XIONG GQ, *et al.* Comparison of metabolic residues of eugenol and *Tricaine Methanesulfonate* (MS-222) in *Largemouth bass* [J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(3): 56–64, 71.
- [32] 周翠平. 罗非鱼二氧化碳麻醉无水保活技术研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.
- ZHOU CP. Study on the keep-alive technology without water *Oftilapia* anesthetized by carbon dioxide [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016.
- [33] 申淑琦, 万玉美, 申亮, 等. 温度、湿度和氧气对海湾扇贝无水保活的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(5): 492–497.
- SHEN SQ, WAN YM, SHEN L, *et al.* Effects of temperature, humidity

- and oxygen on keeping-alive without water of bay scallop *Argopecten irradians* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(5): 492–497.
- [34] 王志松, 隋锡林, 袁付. 模拟生态条件初探魁蚶致死原因[J]. 水产科学, 1996(2): 31–33.
- WANG ZS, SUI XL, YUAN F. Study on the death of *Scapharca broughtonii* by ecological mats under simulated conditions [J]. Fishery Science, 1996(2): 31–33.
- [35] 胡园, 李敏, 方军, 等. 基于保活和品质变化规律分析缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 贮藏过程中的代谢特性[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 32–38, 89.
- HU Y, LI M, FANG J, *et al.* The metabolic characteristics of razor clams (*Sinonovacula constricta*) during storage based on the analysis of survival rate and quality change [J]. Modern Food Science & Technology, 2018, 34(3): 32–38, 89.
- [36] 方佳琪, 张敏. 低温无水保活对缢蛏活性氧代谢、糖原及乳酸的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(5): 764–770.
- FANG JQ, ZHANG M. Effects of low-temperature waterless preservation on reactive oxygen species metabolism, glycogen and lactic acid of razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(5): 764–770.
- [37] 陈文秀. 虾夷扇贝保活品质变化与贮藏条件调控技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- CHEN WX. Study on the quality changes of live *Patinopecten yessoensis* and the regulation of storage conditions [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [38] 苏艳玲. 菲律宾蛤仔低温保活及营养成分变化的研究[J]. 晋中学院学报, 2019, 36(3): 38–44.
- SU YL. Study on the low temperature survival and nutrient change of *Ruditapes philippinarum* [J]. Journal of Jinzhong University, 2019, 36(3): 38–44.
- [39] 高捷, 刘红英, 齐凤生, 等. 缢蛏保活过程中糖原变化的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 361–362, 421.
- GAO J, LIU HY, QI FS, *et al.* Research on changes of glycogen of *Sinonovacula constricta* during its life-keeping process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(5): 361–362, 421.
- [40] 胡远辉, 杜童申, 陆益钊, 等. 缢蛏无水保活过程中营养成分和生化特性变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(24): 9549–9555.
- HU YH, DU TS, LU YB, *et al.* Study on the nutrient compositions and biochemical characteristics of *Sinonovacula constricta* during survival without water [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(24): 9549–9555.
- [41] 郝爽, 张敏. 不同冷胁迫方式对缢蛏无水保活期抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 584–590.
- HAO S, ZHANG M. Effects of different cold stress methods on antioxidant enzyme activity and lipid peroxidation of razor clam *Sinonovacula constricta* during keeping alive under air exposure [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2020, 35(4): 584–590.
- [42] 方佳琪, 张敏, 郑凯, 等. 急性温度胁迫对缢蛏不同组织脂质过氧化及抗氧化生理响应的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 226–233.
- FANG JQ, ZHANG M, ZHENG K, *et al.* Effects of acute temperature stress on lipid peroxidation and antioxidant physiological responses of different tissues of razor clam *Sinonovacula constricta* [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(2): 226–233.
- [43] 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 LL, LIN CX, ZHANG GC, *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.
- [44] RAN ZS, CHEN H, RAN Y, *et al.* Fatty acid and sterol changes in razor clam *Sinonovacula constricta* (Lamarck 1818) reared at different salinities [J]. Aquaculture, 2017, 473: 493–500.
- [45] 倪锦, 沈建. 冷海水喷淋对皱纹盘鲍生态冰温保活的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 953–956, 940.
- NI J, SHEN J. Use of refrigerated-seawater spray in keeping *Haliotis discus hannai* alive at ecological ice temperature [J]. Modern Food Science & Technology, 2013, 29(5): 953–956, 940.
- [46] 林恒宗. 太平洋牡蛎人工海水净化及生态冰温保活中品质变化规律研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
- LIN HZ. Research on quality changes rule of *Crassostrea gigas* in artificial seawater depuration and ecological ice temperature keep alive [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022.
- [47] 刘红英, 齐凤生, 王岳鸿, 等. 毛蚶保活技术研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(26): 14449–14454.
- LIU HY, QI FQ, WANG YH, *et al.* Study on technology of life-keeping for *Scapharca subcrenata* out of water [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(26): 14449–14454.
- [48] 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 JL, ZHANG CY, QIN XM, *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.
- [49] 胡望娇, 王翠华, 冯广朋, 等. 丁香酚和MS-222对松江鲈的麻醉效果[J]. 海洋渔业, 2023, 45(2): 181–190.
- HU WJ, WANG CH, FENG GP, *et al.* Anesthetic effects of eugenol and MS-222 on *Trachidermus fasciatus* [J]. Marine Fisheries, 2023, 45(2): 181–190.
- [50] 张伟佳, 李海东, 高阳, 等. MS-222对大黄鱼(*Larimichthys crocea*)麻醉保活运输效果研究[J]. 海洋与湖泊, 2023, 54(2): 559–565.
- ZHANG WJ, LI HD, GAO Y, *et al.* Effect of anesthetic transportation of *Larimichthys crocea* in MS-222 [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2023, 54(2): 559–565.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)