

对虾绿色健康养殖模式尾水处理研究进展

王晓璐¹, 刁菁¹, 樊英¹, 盖春蕾¹, 叶海斌¹, 刘洪军¹, 王淑生², 付壤辉³, 王友红^{1*}

(1. 山东省海洋生物研究院, 山东省海水养殖病害防治重点实验室, 山东青岛 266104; 2. 滨州市海洋发展和渔业局渔业技术推广站, 山东滨州 256600; 3. 山东省友发水产有限公司, 山东滨州 251900)

摘要 依据国内外有关水产养殖水质处理的相关研究以及实际生产中的健康养殖模式, 提出了对虾绿色健康养殖模式尾水处理系统, 详细介绍了该系统的相关处理技术, 如重力沉降、物理过滤、生物净化、人工湿地以及工厂化循环水等技术。**关键词** 绿色健康养殖模式; 物理过滤; 生物净化; 人工湿地**中图分类号** S955.7 **文献标识码** A**文章编号** 0517-6611(2021)11-0016-04**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.11.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Research Progress on the Tail Water Treatment of Green and Healthy Culture Mode of Shrimp****WANG Xiao-lu, DIAO Jing, FAN Ying et al** (Shandong Provincial Institute of Marine Biology, Key Laboratory of Mariculture Disease Control of Shandong Province, Qingdao, Shandong 266104)**Abstract** Based on the related researches with the aquaculture water quality treatment at home and abroad, and healthy culture mode of shrimp in the actual production, this paper put forward the tail water treatment of green and healthy culture mode of shrimp, and introduced the related treatment technologies of this system in detail, such as gravity sedimentation, physical filtration, biological purification, artificial wetland, industrial recycling water.**Key words** Green and healthy culture mode; Physical filtration; Biological purification; Artificial wetland

20世纪末期,在大菱鲆引进的强力推动下,工厂化循环水养殖模式开始定向研究和推广应用,因节能、节水、节地、减排、安全、高效、不受季节限制等优点,正在迅速推动鲆类养殖产业朝现代化和规模化方向发展^[1-4]。进入21世纪,随着凡纳滨对虾养殖的快速发展,我国对虾养殖业进入新的发展阶段^[5-6]。对虾养殖规模不断扩大,但由于养殖技术水平的限制^[7],养殖过程中设施化、集约化程度不高^[8-9],对虾养殖业的发展以牺牲环境为代价^[10-12],导致养殖池塘占地面积大但产量较低,养殖用水利用率低,养殖自身有机污染物以及养殖废水对水域及沿海生态环境造成了严重影响^[12-13],病害频繁发生^[14-15],都已经成为困扰对虾海水养殖业的瓶颈^[16-17]。

对虾绿色养殖新模式是在循环水养殖的基础上,耦合陆基生态化养殖模式,为实现对虾养殖用水资源化利用而提出的。对虾绿色健康养殖模式尾水处理系统综合了重力沉降、物理过滤、生物净化、人工湿地、工厂化循环水处理技术,将各种新兴的养殖模式、技术综合运用,将养殖废水净化再利用。该模式以养殖过程中实现绿色环保、高效生产为前提,以调控养殖水环境并达到循环利用为核心,以减少养殖污染物排放为目的,有效改善养殖环境,降低饵料系数,提升单位水体养殖容纳量,带动凡纳滨对虾养殖产业的提质增效,提高海洋资源利用效率,减少污染物排放,保护海洋环境。虽然养殖废水属于轻度污染水^[18-19],但若要达到循环利用、减少排放,水处理是关键,技术要求相对较高。在生产上,对虾

绿色健康养殖模式水处理系统历经物理过滤、化学过滤、生物过滤等过程;在技术上,采用生物絮团,固体代谢物去除、鱼、贝、藻类的生物净化,人工湿地,工厂化循环水处理工艺等一系列手段进行处理。其中,水净化处理环节是生态工业化养殖模式的核心。尤其是对虾养殖过程中,残饵粪便量大,有效去除养殖废水中大量的粪便和有害物质,使养殖废水达到再利用的标准,是对虾绿色健康养殖模式的重点。

1 绿色健康养殖模式尾水处理核心技术

绿色健康养殖模式尾水循环处理系统是在现有工厂化循环水处理技术的基础上,综合了虾、鱼、贝、藻循环养殖模式、人工湿地,利用了物理技术、化学技术和生物技术,实现有效净化水体,使养殖废水达到循环利用的标准,同时收获了虾、鱼、贝类。对虾绿色养殖模式尾水处理工艺流程如图1所示。

1.1 大颗粒物物理沉降和微滤机过滤 大颗粒物(TSS)主要是由对虾粪便和残饵组成^[20]。在对虾集约化养殖中,投喂频率高,水体中颗粒物量大^[21-22],据报道工厂化养殖废水中TSS含量为172.6~220.4 mg/L^[23]。水体中大量的TSS降低了养殖水体的透明度^[24],消耗水体中的溶解氧,产生氨氮和亚硝酸盐,引起养殖动物应激反应^[25],影响鳃呼吸^[26],降低鱼类抗病力^[27]。据报道,TSS在水力的撞击作用下会形成小的颗粒物,危害鱼鳃^[28];未经处理的悬浮颗粒物会对贝类生长产生不利的影响^[29]。在生态工业化循环水养殖模式中,根据对虾养殖水体中悬浮物易沉降的特点^[30],采用的第一道工序是TSS物理沉降。沉降能够有效去除养殖水体中的悬浮物,当水力停留为4h左右时去除率达到50%,可将较大颗粒的悬浮物质去除^[24,31]。但是,水体中悬浮物粒径通常小于100 μm,且不易沉降和去除^[32]。在《工厂化循环水养殖技术规范》中,循环水养殖系统中悬浮颗粒物含量要求低于

基金项目 山东省现代农业产业技术体系对虾蟹类产业创新团队项目(SDAIT-13);山东省农业重大应用技术创新项目。**作者简介** 王晓璐(1989—),男,山东青岛人,助理研究员,博士,从事水产动物健康养殖及病害防控研究。*通信作者,助理研究员,硕士,从事海水生物健康养殖研究。**收稿日期** 2020-10-21

10 mg/L^[33-34]。对物理沉降后的废水进行微滤机过滤是生态工业化水处理的第二道工序。微滤机耗能少,占地面积小,且滤网孔大小可以调控^[35]。宿墨等^[36]研究表明,根据去除率和能耗可知 200 目筛网的微滤机最经济适用,且去除率达 54.09%。傅雪军等^[37]研究表明 150 目微滤机对悬浮固体物

(SS)的去除率为 67.13%。林中凌^[38]研究表明,微滤机对颗粒粒度 100~200 μm 的悬浮固体物去除率为 80%。Chen 等^[39]研究表明在高密度养殖水体中 80%~90% 的悬浮颗粒物大小小于 30 μm,很难被去除。因此,经过沉降和微滤后的养殖废水进入第三道处理工序。

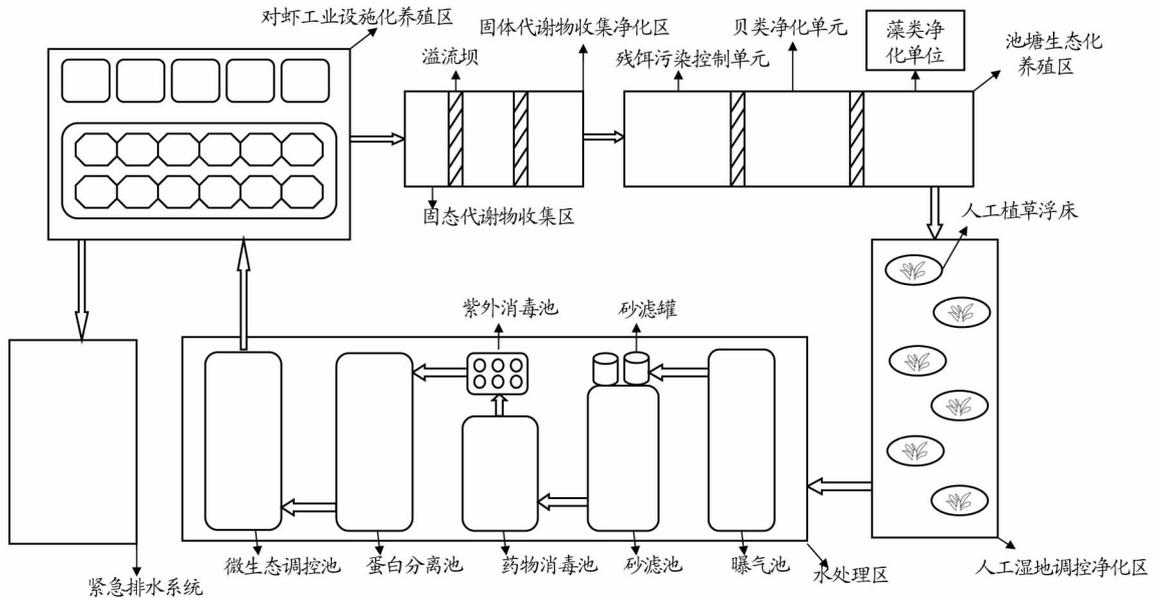


图 1 对虾绿色养殖模式尾水处理工艺流程

Fig. 1 The tail water treatment process of shrimp's green aquaculture model

1.2 鱼-贝-藻滤食净化 鱼-贝-藻净化池既是生态养殖池也是水质净化池,即在封闭循环系统池塘中放养生态位互补的经济动植物,通过水循环将它们综合在一起,对养殖生态环境进行生物调控^[40]。它既能满足水环境中生物多样性的要求,实现水生生态系统内的物质循环,增强水体自我净化、自我维持的功能,又能在不损害水域生态环境的情况下提高养殖的经济效益^[41-42]。目前,多池循环系统的相关研究报道较少。黄国强等^[43]报道了一种新型对虾多池循环水养殖模式,该养殖模式中水处理池养殖的水产品主要利用养殖池未完全利用的残饵和粪便,不需要额外增加饵料和劳动力的投入,其产出投入比较高。申玉春等^[44]通过对虾-鱼-贝-藻多池循环模式的研究发现,循环水养殖系统内虾池水体中悬浮物数量、化学需氧量(COD)、氨态氮和总氮含量比对虾单养池明显降低。Kongkeo 等^[45]研究表明对虾病大流行后,泰国从疾病预防出发首先研制并使用对虾室外循环水研制模式。Li 等^[46]提出通过高产量的养殖生物,加大生物净化池的生产作用,将水循环养殖变成水循环综合养殖模式。

在对虾绿色健康养殖模式尾水处理系统中,过滤的废水通过鱼类养殖池后,再放养一些滤食性鱼类,如罗非鱼、梭鱼等^[44-47]将废水中残留的粒径小于 100 μm 的固体物质滤食;研究报道,罗非鱼以滤食水体中粒径大于 25 μm 的固体颗粒为食物;此外,还能控制虾病的链式传染^[48-49]。养殖废水依次通过溢流坝进入贝类养殖池,悬挂毛蚶、扇贝、牡蛎等滤食性较好的贝类,贝类具有强大的滤食能力^[50-51],主要以小型浮游植物和悬浮有机颗粒为食。卜雪峰^[52]研究发现牡蛎在

24 h 内对水体中悬浮颗粒物的去除率可达 93%;贝类滤食不仅能保持水质稳定,充分利用水体中残饵、粪便来提高对虾养殖池中的能量转化,而且能有效控制细菌类疾病的发生^[53]。养殖废水再次通过藻类养殖池吸收水体中的富营养盐,石莼^[54]、裙带菜^[42]、江蕲^[44]等大型植物对水体中的氮、磷等营养元素具有很好的利用率;Borowitzka 等^[55]于 1957 年提出利用藻类去除水体中的氮、磷等营养物质。藻类不仅能够吸收水中的氮、磷等营养物质,提高氮的利用率,防治对虾的细菌性疾病,而且能提高虾的产量,达到增产增收的目的^[56-57]。鱼-贝-藻循环养殖池充分发挥各种养殖生物饵料资源互补的积极作用,避免同池混养的多种养殖生物在饵料资源、生存空间和溶解氧上的直接竞争以及自身代谢废物造成的相互危害,同时提高了饵料利用率,降低了饵料系数^[44],提高了经济效益。

1.3 人工湿地 湿地是指天然或人工、长久或暂时的沼泽地、泥炭地或水域地带,带有或静止或流动、或为淡水、半咸水或咸水水体者,包括低潮时水深不超过 6 m 的水域^[58]。人工湿地(constructed wetland)是人工设计与建造的由饱和基质、挺水植物与沉水植物、动物以及水体组成的复合体^[59]。人工湿地技术在国内外处理农业污水、工业污水、生活污水等方面被广泛应用^[60-62]。

绿色健康养殖模式尾水采用人工湿地处理技术,经过鱼-贝-藻处理后的养殖废水含有氨氮、亚硝态氮、磷、其他微量元素等,最后在人工湿地生态系统中进一步净化。人工湿地污水处理是基质、水生植物和微生物三者或者三者相互之

间通过一系列的物理、化学、生物途径,完成了对污染物的高效去除^[63]。首先,人工湿地对磷有较高的去除率^[64],其中基质对磷的去除贡献率约87%^[65];植物对轻度富营养化水体磷的去除贡献率为51.0%^[66];磷细菌等微生物的生化反应以及酶的催化反应影响有机磷的分解矿化以及无机磷的溶解、氧化、还原等^[67]。其次,人工湿地对脱氮有良好的效果,氨化、硝化、反硝化以及植物吸收是去除氮的主要途径,基质对氮的去除率在80%以上^[68-70];水生植物为微生物提供附着质,直接吸收氮。Breen^[71]认为植物吸收是湿地主要的脱氮途径,占比50%;Haberl等^[72]认为无论是表面流还是潜流湿地,硝化、反硝化都是脱氮的主要过程,微生物菌的转化至关重要。第三,人工湿地通过过滤、吸附等截留手段加上灭活、自然死亡、竞争等能够有效去除病原微生物^[67]。最后,人工湿地能够有效净化分离污水中的重金属离子^[73]。人工湿地技术在生态工业化养殖废水处理中弥补了生物净化池的残留遗漏,使水质进一步净化处理。

1.4 工厂化循环水处理 经过沉淀、过滤、生物净化、人工湿地调控,养殖废水完全达到自然状态下水质标准。在养殖水源进入养殖池再次利用以前,生态工业化养殖模式水处理再次利用工厂化循环水处理技术,对养殖水质进一步调控。

水先经砂滤罐,砂滤罐在工厂化循环水养殖鱼类方面十分普遍,主要是对从自然界提汲的水源进行过滤,去除悬浮物质和较大的固体杂质^[74-76]。据报道,砂滤罐对悬浮物的去除效果达99.83%^[77],对氨氮、总磷等也有一定的去除率;砂滤罐自带有反冲洗装置^[36],大大地节省了劳动力。

臭氧能够快速杀灭细菌繁殖体和芽孢、病毒、真菌等,并可以破坏肉毒杆菌毒素,杀菌彻底,无残留^[78-79]。在工厂化循环水系统中合理使用臭氧能够迅速彻底杀灭病原菌^[80],对固体悬浮物^[81]、总氮氮和亚硝酸盐氮具有良好的去除效果^[82]。最后,经过曝气和泼洒微生物制剂,以增加溶解氧含量,调节水质。提高溶解氧含量是养殖过程中水质调控的一个重要措施^[83],可以有效抑制氨氮、亚硝酸盐、硫化氢等物质的产生^[84],提高了对虾对氨氮的耐受力 and 免疫力,提高了对虾的产量^[85];利用微生物制剂调控水质,可以达到菌相藻相平衡,建立良好的水源环境。

2 结语

对虾绿色健康养殖模式尾水处理系统综合了重力沉降、物理过滤、生物净化、人工湿地、工厂化循环水处理技术,将各种新兴的养殖模式、技术综合运用,彻底将养殖废水净化再利用,并且整个过程中提高了饵料的利用率,养殖生物体的产量大幅度提高,对周围环境无任何不利的影响,真正实现了生态、绿色健康养殖,节约了水资源,符合可持续发展的战略要求。

参考文献

[1] 雷霖霖. 中国海水养殖大产业架构的战略思考[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 600-609.
 [2] 雷霖霖. 迎接鲆鲽类工业化养殖新时代——鲆鲽类走工业化养殖发展之路的战略思考[J]. 科学养鱼, 2010(10): 1-4.
 [3] CHEN S L, LING J, BLANCHETON J P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors[J]. Aquac Eng, 2006, 34(3): 179-197.

[4] MILLAMENA O M, CASALMIR C M, SUBOSA P F. Performance of recirculating systems for prawn hatchery and broodstock maturation tanks[J]. Aquac Eng, 1991, 10(3): 161-171.
 [5] 宋盛亮. 对虾养殖现状、发展趋势与对策[J]. 水产科技, 2006(2): 1-7.
 [6] 孟庆武, 王圣, 赵玉洁, 等. 我国对虾工厂化养殖的特点、发展趋势及前景[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(3): 124-127.
 [7] MAHON J L. Density alters the form of intraspecific encounters in *Penaeus vannamei*[J]. Pacific science, 1990, 44(2): 190.
 [8] 殷蕊, 官春光, 孙桂清, 等. 利用鲆鲽类养殖设施工厂化养殖南美白对虾技术[J]. 河北渔业, 2015(6): 31-33.
 [9] 王芳芳, 陈萍, 潘清清, 等. 南美白对虾设施化养殖水处理技术[J]. 中国水产, 2016(3): 74-77.
 [10] WU R S S, LAM K S, MACKAY D W, et al. Impact of marine fish farming on water quality and bottom sediment: A case study in the sub-tropical environment[J]. Mar Environ Res, 1994, 38(2): 115-145.
 [11] 沈建筑, 李满轩, 李志辉, 等. 浅析淡水养殖尾水处理技术及达标排放措施[J]. 水产养殖, 2019, 40(5): 37-39.
 [12] 周小壮, 林小涛, 林继辉, 等. 不同模式对虾养殖的自身污染及其环境效应[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 68-72.
 [13] 陈水土, 苏国成, 张跃平, 等. 半封闭式对虾养殖体系的水环境特征[J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 85-90.
 [14] 孙伯伦, 张国清, 王小波, 等. 养殖对虾暴发性流行病防治措施[J]. 现代渔业信息, 1998, 13(6): 1-4.
 [15] 苏国成, 陈水土, 陈然, 等. 福建省连江县养殖对虾病毒性疾病的调查研究[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 30-36.
 [16] 崔禾. 纵观全球养殖对虾产业现状分析我国对虾产业发展趋势[J]. 中国水产, 2006(4): 14-17.
 [17] 彭建, 周凡, 贝亦江, 等. 南美白对虾养殖尾水生态处理技术研究进展[J]. 河北渔业, 2019(11): 53-56.
 [18] 姜延颇. 水产养殖系统的尾水处理方法[J]. 江西水产科技, 2020(1): 45-48.
 [19] 宋志文, 王玮, 赵丙辰, 等. 海水养殖废水的生物处理技术研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 13-17.
 [20] 李宏伟, 张清靖, 刘青, 等. 循环水养殖系统中悬浮颗粒物去除工艺研究概况[J]. 水产科学, 2015, 34(8): 527-532.
 [21] 周歧存, 郑石轩, 高雷, 等. 投喂频率对南美白对虾(*Penaeus vannamei* Boone)生长、饲料利用及虾体组成影响的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2003(2): 64-68.
 [22] 叶乐, 林黑着, 李卓佳, 等. 投喂频率对凡纳滨对虾生长和水质的影响[J]. 南方水产, 2005, 1(4): 55-59.
 [23] 李玉全. 对虾工厂化养殖与池塘养殖环境差异及简易水处理系统效果分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(10): 564-569.
 [24] 侯秀富, 郭沛涌, 张华想, 等. 水体悬浮颗粒物对斜生栅藻生理生化及光合活性的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1446-1457.
 [25] CRIPPS S J, BERGHEIM A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems[J]. Aquac Eng, 2000, 22(1/2): 33-56.
 [26] LILTVED H, CRIPPS S J. Removal of particle-associated bacteria by pre-filtration and ultraviolet irradiation[J]. Aquac Res, 1999, 30(6): 445-450.
 [27] BULLOCK G, HERMAN R, HEINEN J, et al. Observations on the occurrence of bacterial gill disease and amoeba gill infestation in rainbow trout cultured in a water recirculation system[J]. J Aquat Animal Heal, 1994, 6(4): 310-317.
 [28] CHEN S, STECHEY D, MALONE R F. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems[C]//TIMMONS M B, LOSORDO T M. Aquaculture water reuse systems: Engineering design and management. Amsterdam: Elsevier Science BV, 1994: 61-100.
 [29] HOPKINS J S, HAMILTON R D II, SANDIFER P A, et al. The production of bivalve mollusks in intensive shrimp ponds and their effect on shrimp production and water quality[J]. World Aquacult, 1993, 24(2): 74-77.
 [30] JONES A B, DENNISON W C, PRESTON N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: A laboratory scale study[J]. Aquaculture, 2001, 193(1/2): 155-178.
 [31] 张俊新, 刘长发, 何洁, 等. 工厂化养殖循环水固液分离特性及处理工艺选择分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1173-1176.
 [32] 辛乃宏, 于学全, 吕志敏, 等. 石斑鱼和半滑舌鲷封闭循环水养殖系统的构建与运用[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 21-25, 40.
 [33] 杨菁, 倪琦, 张宇雷, 等. 对虾工程化循环水养殖系统构建技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 136-140.
 [34] 刘兴国, 刘兆普, 徐皓, 等. 生态工程化循环水池塘养殖系统[J]. 农业

- 工程学报,2010,26(11):237-244.
- [35] 陈建平,曹冬冬. 水处理微滤机过滤能力和堵塞问题的研究[J]. 天津工业大学学报,2013,32(5):57-60.
- [36] 宿墨,刘晃,宋红桥,等. 转鼓式微滤机颗粒去除率及能耗的运行试验研究[J]. 渔业现代化,2008,35(5):9-12.
- [37] 傅雪军,马绍赛,朱建新,等. 封闭式循环水养殖系统水处理效率及半滑舌鲷养殖效果分析[J]. 环境工程学报,2011,5(4):745-751.
- [38] 林中凌. 两种鱼类工厂化循环水养殖过程的水质调控及水中悬浮颗粒物分类[D]. 大连:大连海洋大学,2016.
- [39] CHEN S L, TIMMONS M B, ANESHANSLEY D J, et al. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications[J]. Aquaculture, 1993, 112(2/3):143-155.
- [40] 郑杰民,叶乐,朱小明. 对虾池塘养殖生态系统的研究进展[J]. 福建水产,2006,28(3):73-79.
- [41] 李德尚,董双林. 对虾与鱼、贝类封闭式综合养殖的实验研究[J]. 海洋与湖沼,2002,33(1):90-96.
- [42] 虞为,李卓佳,朱长波,等. 我国对虾生态养殖的发展现状、存在问题与对策[J]. 广东农业科学,2011,38(17):168-171.
- [43] 黄国强,李德尚,董双林. 一种新型对虾多池循环水综合养殖模式[J]. 海洋科学,2001,25(4):48-49,57.
- [44] 申玉春,叶富良,梁国藩,等. 虾—鱼—贝—藻多池循环水生态养殖模式的研究[J]. 湛江海洋大学学报,2004,24(4):10-16.
- [45] KONGKEO H. Comparison of intensive shrimp farming systems in Indonesia, Philippines, Taiwan and Thailand[J]. Aquac Res, 1997, 28(10):789-796.
- [46] LI D S, DONG S L. Summary of studies on closed-polyculture of penaeid shrimp with fishes and moluscans[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2000, 18(1):61-66.
- [47] 宋奔奔,吴凡,倪琦. 国外封闭循环水养殖系统工艺流程设计现状与展望[J]. 渔业现代化,2012,39(3):13-18,39.
- [48] 张鸿雁,李德尚,王岩. 缢蛭对对虾池浮游生物群落结构的影响[J]. 青岛海洋大学学报,1998,28(2):210-216.
- [49] 田相利,李德尚,董双林,等. 对虾—罗非鱼—缢蛭封闭式综合养殖的水质研究[J]. 应用生态学报,2001,12(2):287-292.
- [50] 颜天,傅萌,刘卫,等. 双壳类清除率在海洋污染物毒性研究中的应用[J]. 海洋科学,2003,27(1):50-53.
- [51] 秦培兵,卢继武. 滤食性贝类对浅海养殖系统中营养盐循环的影响[J]. 海洋科学,2001,25(5):27-29.
- [52] 卜雪峰. 贝藻处理海水养殖废水的应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [53] 许永安,廖登远,章超桦,等. 贝类净化中试生产工艺技术[J]. 福建水产,2007,29(3):14-18.
- [54] 王吉桥,靳翠丽,张欣,等. 不同密度的石莼与对虾的混养实验[J]. 水产学报,2001,25(1):32-37.
- [55] BOROWITZKA M A, BOROWITZKA L J. Micro-algal biotechnology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988:305.
- [56] 刘思俭,揭振英,曾淑芳. 中国江蕨的商品生产及其与对虾混养[J]. 湛江海洋大学学报,1997,17(2):27-30.
- [57] 王焕明. 藻虾混养的研究 I. 江蕨与新对虾、青蟹在鱼塘中混养的试验[J]. 海洋湖沼通报,1994(3):52-59.
- [58] 李禄康. 湿地与湿地公约[J]. 世界林业研究,2001,14(1):1-7.
- [59] 毛雪慧,易科浪. 人工湿地对危险废物处理站尾水处理效果评价[J]. 中国农村水利水电,2020(3):83-86,90.
- [60] REVITT D M, WORRALL P, BREWER D. The integration of constructed wetlands into a treatment system for airport runoff[J]. Water Sci Technol, 2001, 44(11/12):469-476.
- [61] 杨旭,于水利,张洪洋,等. 潜流人工湿地低温下黄河原水预处理效果研究[J]. 生态环境,2008,17(1):70-73.
- [62] 朱文玲,崔理华,朱夕珍,等. 混合基质垂直流人工湿地净化废水效果[J]. 农业工程学报,2009,25(S1):44-48.
- [63] 曹大伟,沙玥,金秋,等. 多级复合型人工湿地工艺对污水厂尾水处理净化效果的试验研究[J]. 环境科技,2019,32(3):12-16.
- [64] 李晓东,孙铁研,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报,2007,27(3):1226-1232.
- [65] 王荣,贺锋,徐栋,等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(S1):12-18.
- [66] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. 生态环境,2006,15(2):391-396.
- [67] 陈迪,杨勇,郑洋,等. 人工湿地对病原微生物去除的研究进展[J]. 农业环境科学学报,2013,32(9):1720-1730.
- [68] 刘学功,李金中,李学菊. 人工湿地填料结构对水质净化效果影响研究[J]. 海河水利,2008(4):40-42.
- [69] 周炜,黄民生,谢爱军,等. 人工湿地净化富营养化河水试验研究(二):基质层及流态对氮素污染物净化效果的影响[J]. 净水技术,2006,25(4):40-44.
- [70] 李志杰,孙升梅,刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展[J]. 工业水处理,2012,32(4):1-5.
- [71] BREEN P F. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. Water Res, 1990, 24(6):689-697.
- [72] HABERL R, PERFLER R. Nutrient removal in a reed bed system[J]. Water Sci Technol, 1991, 23(4/5/6):729-737.
- [73] 吴长淋. 人工湿地处理含重金属废水的研究现状及展望[J]. 化学工程师,2009,23(3):38-41.
- [74] 朱学宝,谭洪新,罗国芝. 封闭循环工厂化水产养殖水质净化系统的技术构成[J]. 内陆水产,2000,25(10):24-25.
- [75] 雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术[M]. 北京:中国农业出版社,2005:365-408.
- [76] 胡金成,杨永海,张树森,等. 循环水养殖系统水处理设备的应用技术研究[J]. 渔业现代化,2006,33(3):15-16,18.
- [77] 周阳,陈有光,段登选,等. 砂滤罐处理工厂化养鱼循环水效果[J]. 农业工程学报,2009,25(12):254-258.
- [78] 臧维玲,戴习林,徐嘉波,等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报,2008,32(5):749-757.
- [79] 祝莹,杨绍斌. 臭氧配合复合光合细菌对虹鳟鱼病的防治研究[J]. 水产科技情报,2009,36(1):27-30.
- [80] SCHROEDER J P, CROOT P L, VON DEWITZ B, et al. Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquacultural systems[J]. Aquac Eng, 2011, 45(1):35-41.
- [81] 宋奔奔,倪琦,张宇雷,等. 臭氧对大菱鲆半封闭循环水养殖系统水质净化研究[J]. 渔业现代化,2011,38(6):11-15.
- [82] DAVIDSON J, GOOD C, WELSH C, et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems[J]. Aquac Eng, 2011, 44(3):80-96.
- [83] 韩永望,李健,潘鲁青,等. 微孔管增氧和气石增氧对凡纳滨对虾室内养殖影响的比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(4):41-47.
- [84] 徐勇,张修峰,曲克明,等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对半滑舌鲷的急性毒性效应[J]. 海洋水产研究,2006,27(5):28-33.
- [85] 王娟,曲克明,刘海英,等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对中国对虾的急性毒性效应[J]. 海洋水产研究,2007,28(6):1-6.

(上接第15页)

- [36] REDONDO-GÓMEZ S, MATEOS-NARANJO E, VECINO-BUENO I, et al. Accumulation and tolerance characteristics of chromium in a cordgrass Cr- hyperaccumulator, *Spartina argentinensis* [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 185(2/3):862-869.
- [37] 郑芝梅,叶华,华平. 黄豆发芽过程中铬的生物富集效应的研究[J]. 食品工业科技,2005,26(6):101-103.
- [38] 徐胜光,周建民,刘艳丽,等. 几种化肥对外源 Cr(VI)形态和小白菜吸收铬的影响[J]. 南京农业大学学报,2007,30(4):52-57.
- [39] 李廷轩,马国瑞. 籽粒苋—烟草间作对烟叶部分矿质元素含量及品质的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):138-140,143.
- [40] 韩建均,柴陆军,张娟,等. 硫酸盐还原菌原位修复六价铬污染土壤[J]. 化工环保,2020,40(6):613-618.
- [41] 李本晟. 蚯蚓粪对植烟土壤与烤烟根系特性及烟叶品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.