

· 综述 ·

对虾工厂化养殖的系统结构

曹煜成, 李卓佳, 贾晓平, 文国樑, 李纯厚

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300)

摘要: 对虾工厂化养殖是在人工控制条件下, 利用有限水体进行对虾高密度养殖的一种生产方式, 它依托一定的养殖工程和水处理设施作为技术支撑, 融合无公害生产的管理模式, 是一种高效的环境友好型养殖。文章就构建对虾工厂化养殖平台中的各系统环节及该种生产模式的概况作系统综述。

关键词: 对虾工厂化养殖; 模式

中图分类号: S969

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2006)03-0072-05

System configuration of industrial shrimp farming

CAO Yucheng, LI Zhuojia, JIA Xiaoping, WEN Guoliang, LI Chunhou

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Industrial shrimp farming was a kind of high-yield shrimp culture mode in limited water cubage under human-control circumstance, which shrimp farming system depended on aquaculture engineering, water treatment system and a series of managerial approach of unpolluted shrimp farming. It was an efficiency and environmental friendly aquaculture mode. The intensive shrimp culture mode and groupware of industrial shrimp farming system would be summarized in this review.

Key words: industrial shrimp farming; mode

传统的水产养殖业占用了大面积的水域资源, 且容易受到自然灾害的影响, 造成重大的经济损失。高密度的养殖虽然在短期内能取得较高的经济效益, 但养殖过程中有害物质的积累, 对环境造成了巨大的负面影响, 也给水产养殖业的发展带来了极大的风险和困难^[1]。水产养殖业作为农业经济重要支柱之一, 正面临产业结构调整 and 升级的问题。“九五”期间农业部已将“设施农业高效优化综合技术研究”列入重点科研项目。对虾工厂化养殖作为设施渔业的一个重要组成部分, 近年来在各级政府的支持下和科研工作者的协作下在全国各地逐渐得到推广, 但对虾工厂化养殖在不同的地区形成了各自不同的特色模式, 本文就当前所形成的一些对虾工厂化养殖模式进行了系统的综述, 以期为进一步探讨构建因时、因地制宜的对虾工

厂化养殖模式提供参考。

1 对虾工厂化养殖的概念

1.1 设施渔业

设施农业是指利用人工建造的设施, 为种植业、养殖业及产品的储藏保鲜等提供良好的环境条件, 以期将农业生物的遗传潜力变为现实的巨大生产潜力, 获得速生、高产、优质、高效的农产品。先进的生产工艺和技术是通过一定的生产设施作为载体来实现的, 现代化设施可调节生物生长要素, 能把外界环境不良影响减少到最低限度, 同时对内环境加以补充, 设施农业在一定程度上克服了传统农业难以解决的限制因素, 使得资源要素配置合理, 加强了资源的集约高效利用, 从而大幅度提高了农业系统的生

收稿日期: 2006-03-22; 修回日期: 2006-04-11

资助项目: 国家十五攻关项目(2004BA526B0202); 广东省重大科技兴渔项目(B200201A01)

作者简介: 曹煜成(1979-), 男, 研究实习员, 从事水产微生物及健康养殖技术研究。E-mail: cyc_169@163.com

通讯作者: 李卓佳, E-mail: zhuojiali609@163.com

产力,它能使单位面积产出成倍乃至数十倍地增长。相应的设施渔业也随之提到了水产养殖业的发展进程上来。

设施渔业是20世纪中期发展起来的集约化高密度养殖产业。它集现代工程、机电、生物、环保、饲料科学等多学科为一体,运用各种最新科技手段,在陆上或海上营造出适合鱼类生长繁殖的良好水体与环境条件;把养殖置于人工控制状态,以科学的精养技术,实现养殖对象的全年稳产、高产。设施渔业是渔业现代化的重要手段,是高科技、产业化的结合,是由粗放式生产经营向集约化过渡的重要形式,它的发展与技术,将对整个水产养殖的技术进步与现代化进程起到带动作用。海水设施渔业立足于海洋环境保护,对养殖水体进行净化处理,减少近海养殖强度,向外海扩展,将产业与环境密切结合在一起,具有广阔的发展前景^[2]。当前设施渔业的几种主要生产模式有:对虾工厂化养殖、优质鱼类工厂化养殖、优质鱼类深水网箱养殖、水产经济动物苗种工厂化繁育等等。

1.2 对虾工厂化养殖

对虾养殖业作为水产养殖业支柱之一,其设施化养殖的研究也受到了广大学者的关注。对虾集约化养殖又称为“对虾工厂化养殖”,是在人工控制条件下,利用有限水体进行对虾高密度养殖的一种生产方式,其本质则是应用设施渔业的现代化技术手段进行环境友好型的对虾高水平生产,它是设施渔业的重要组成部分之一。不同的学者对“对虾工厂化养殖”存在不同的认识与诠释,樊祥国^[1]认为:工厂化养殖是一种现代水产养殖方式,其依托一定的养殖工程和水处理设施,按工艺流程的连续性和流水作业性的原则,在生产中运用机械、电气、化学、生物及自动化等现代化措施,对水质、水流、溶氧、光照、饲料等各方面实行全人工控制,为养殖生物提供适宜生长的环境条件,实现高产、高效养殖的目的。王克行^[3]则认为:工厂化养殖是利用工业手段,控制池内生态环境,为对虾创造一个最佳的生存和生活条件,在高密度集约化的放养情况下,投放优质饲料,促进对虾顺利生长,提高单位面积的产量和质量,争取较高的经济效益的一种新型养殖模式。它通过太阳能或其他热能把水温控制在养殖生物最适温度,通过充气甚至充氧保证水体中充足的溶解氧,不仅提供给养殖对象呼吸,还可改善水质条件;通过适量的换水,去除水中有害物质,补充有益物质,保持优良水质条件;通过化学或生物手段,建立一个优良的生物群落,抑制有害生物,避免严重的病害发生;以优质饲料保证对虾生长发育的需要,促进生长和提高抗病力,提高对虾成活率和生长率,提高产品质量和数量,达到优质、高效、高产的目的。

1.3 地方特色的对虾工厂化养殖模式

上述学者所提出的对虾工厂化养殖模式的构建是针对

对虾生产的总体情况而提出的一个整体性概念,而没有具体考虑不同地区、不同海域水质条件的具体差异。因此,针对热带、亚热带海域的特点,以及当地水产养殖从业者的具体实际情况,笔者认为有必要构建一个适宜地方特色的、可大面积推广的对虾工厂化养殖模式。由于南方海域水温高、光照时间长、海域中生物资源丰富,相对北方地区对虾养殖生产的时间较长,因此,可根据其特点充分利用自然资源,再辅以一些人工调控元素,使得对虾养殖生产得以全年开展。所以南方特色对虾工厂化养殖是在人工调控条件下,充分利用南方热带、亚热带海域的自然资源,依托一定的养殖工程和水处理设施,按工艺流程的连续性原则,在生产中运用物理、化学、生物及机电等现代化措施,对水质、水流、饲料等各方面实行半人工或全人工控制,为养殖生物提供适宜健康生长的环境条件,在有限的水体中进行对虾高产、高效的环境友好型养殖。

对于如我国东海、黄渤海海区及欧、美、日等水温较低、光照时间较短的一些海区,则应充分考虑当地的自然条件,添加必要的控温措施(蒸汽式控温系统、锅炉热水循环控温系统)和光照系统(日光式光照系统、光频选择性照射系统),以先进的人工调控技术手段使养殖生产不受气候、水文等不利条件的影响,确保对虾养殖可以按工艺流程的连续性原则进行全年生产。

根据不同地区的水质条件和养殖习惯,各地区经过生产实践摸索,逐渐形成了一套适宜本地区实际应用的工厂化养殖模式。例如在美国、加拿大及南美洲一些地区采用跑道式循环水养殖、常流水养殖、微流水式的有限量水交换养殖等工厂化养殖模式;我国东海、黄渤海地区则多采用全封闭式循环水养殖;热带、亚热带海区的一些国家和地区采用封闭、半封闭的微换水工厂化养殖模式。无论所采用的工厂化养殖技术细节如何变化,其本质仍是一致的。

2 对虾工厂化养殖系统的结构

2.1 处理系统

2.1.1 过滤系统 主要是利用物理过滤法清除悬浮于水体中的颗粒性有机物及浮游生物、微生物等。可采用砂滤、网滤、特定过滤器等方式^[4-5]。在沙石资源丰富的地区一般可采用二级砂滤,即可把水体中的颗粒性物质基本过滤干净;网滤时网目的大小可具体根据水质情况及实际生产的需要而定;也有的养殖者将网滤和砂滤相结合,再利用其它过滤介质形成石英砂、珊瑚砂过滤,麦饭石、沸石与珊瑚混合滤料过滤。有的还在滤料中添加一些多孔固相的吸附剂对水体加以净化,如活性炭、硅胶、沸石等,有报道指出利用活性炭吸附养殖水体中的有机物,最大吸附率可达82%,还有的吸附剂甚至可有效地去除水体中的一些重金属离子^[6]。

在一些机械化较高的工厂化养殖系统中,研究者把上述过滤介质与机电设备加以有机结合,并辅以一些附件设施组成固定筛过滤器、旋转筛过滤器及自动清洗过滤器等高效高价的新型过滤器^[7]。这些过滤器能有效的对养殖水体进行连续性、高通量的过滤处理。

由于养殖过程中不同的管理模式将使得水体中的颗粒性污物情况有所不同,不同粒径的污物大量存在于养殖废水之中,如果采用单一填料的过滤器不能取到良好的净化效果,若采用多种填料混合的滤器则可能由于不同填料间先后次序的安排不合理,其净化效率受到限制。所以,笔者认为可研究开发一种“组合式的滤器系统”,即把不同的填料制成不同的滤器,各种滤器之间可以自由组合,使用时可根据养殖水体中污物的具体情况,选用不同的滤器,并根据污物的粒径大小,科学组合各种滤器,形成一个高效的滤器净化系统,从而大幅提高滤器的净化效率。

2.1.2 消毒系统 在高密度的养殖条件下,水质情况会变得相对较差,水体中除了存在一些理化性的致病因子外,还具有相当数量的致病菌、条件致病菌。这不仅会大量消耗水体中的溶解氧,还会对养殖对虾产生严重的负面影响。因此,在对虾工厂化养殖系统中一般还会配备消毒系统,利用物理、化学的措施减少致病因子对对虾的影响。(1) 紫外线消毒器。紫外线对致病微生物具有高效、广谱的杀灭能力,且所需的消毒时间短,不会产生负面影响。紫外线能穿透致病菌的细胞膜,使得其核蛋白结构发生变化,还可破坏其DNA的分子结构,影响其繁殖能力从而达到灭菌的效果。一般会将柱状紫外灯管置于水道系统中,以230~270 nm波长的紫外线照射流经水道的水体,照射厚度控制在20 mm内,时间大于10 s,照射量为 $10^4 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[7-8]。(2) 臭氧发生器。臭氧发生器主要是依靠所产生的臭氧对水体灭菌消毒。臭氧具有强烈的氧化能力,能迅速地令细胞壁、细胞膜中的蛋白质外壳和其中的一些脂类物质氧化变性,破坏致病菌的细胞结构。此外,还可氧化水体中的一些耗氧物质,使COD、亚硝氮、氨氮的负面影响降低到较低程度。一般在养殖过程中的臭氧使用量控制在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[7-10]。(3) 化学消毒器。化学消毒器中一般会使用漂白粉、次氯酸钠、季铵碘等氧化性介质,利用氧化作用对养殖水体进行消毒。介质的用量要视养殖水体的具体情况而定。

虽然当前所使用的消毒器种类不少,但笔者认为还是应该根据养殖水体的具体情况选用合适的消毒器。相对而言,紫外线消毒器的消毒效果可能不如其后两者的效率高,但其副作用小,安全性较好;化学消毒器的消毒效果虽好,但如果使用不当可能会对养殖水体造成二次污染,例如含氯消毒剂的使用剂量过大,将导致水体中存在残留余氯,这对养殖生物的健康生长将产生不良影响;至于利用臭氧

消毒,则应合理把握好水体中的臭氧含量,经消毒后的水体不能立即进入养殖系统中,而应曝气一段时间使水体中的臭氧降低到一个安全浓度时再行使用。

2.1.3 增氧系统 增氧系统是对虾工厂化高密度养殖中最核心的组成部分之一。在面积较大的养殖池内可装配适量的水车式和水下小叶轮式增氧机,该种增氧机增氧效率高、使用方便,既可使养殖水体产生流动,又可起到增氧的效果,可在水质调节池、二三级对虾养殖池中使用。中小型养殖池可装备罗茨鼓风机、漩涡式充气机和拐咀气举泵增氧。以充气式增氧机供氧具有较好的平稳性,具有动水及增氧的双重效果。一般要求供气量达到养殖水体的0.5%~1.0%以上^[3]。

在高溶氧的水质条件下更有利于养殖动物的生长繁殖,因此,近年来一些新的增氧设施亦在高密度的工厂化养殖中加以应用。如纯氧、液氧、臭氧等发生装置及一些高效气水混合设施也逐渐配备在增氧系统中^[7,11],该项技术的使用可使水体溶氧达到饱和或过饱和状态,提高水体中氧气的溶解率。

2.1.4 增温系统 在温度较低的季节和地区一般会配备一套增温系统以确保养殖生产不受温度条件的限制。较常使用的是锅炉管道加热系统、电热管(棒)系统^[7],在条件允许的地区还可充分利用太阳能、地热水等天然热源,这样既可有效利用天然资源进行多茬养殖,降低能源消耗成本,还可达到清洁生产的目的,降低养殖过程中对水环境、大气环境产生的负面影响。

在南方热带、亚热带海域由于水温处于低温的时间相对较短,对于室外的工厂化养殖池可采用温棚保温、还可添加适量的深层地下水调节水温(在气温为 10°C 左右时,深层地下水的水温一般可以达到 $25 \sim 30^\circ\text{C}$)。所以,笔者认为对于工厂化养殖系统中的控温模块,并不需要采取一成不变的模式配备加温或降温设施,而应根据不同养殖地区的气候、水文等自然条件,充分利用各自的天然优势,合理设计与应用控温系统,降低能耗,减小工厂化养殖的能源成本和环境成本,确保养殖生产的全年顺利开展。

2.1.5 废水处理系统 对虾工厂化高密度养殖不仅要实现高产、高效的生产目的,还要利用一系列综合措施对养殖过程中产生的废水进行处理,以解决常规养殖池塘历来存在的自我污染问题,最大程度地降低高密度养殖给环境带来的负面影响。因此,废水处理系统在对虾工厂化养殖系统中具有重要的意义。由于在养殖过程所产生的废水中存在大量的颗粒性污物及如氨氮、亚硝氮等可溶性有害物质,故在废水处理过程中将应用物理、化学、生物等手段,针对不同形式的污染源进行处理。

(1) 沉淀 对养殖废水中含有的虾壳、对虾残体及排泄物、残饵、水质改良剂等大颗粒物质可在暗室沉淀池

中沉淀处理,使上述物质得以沉降于池底。也有的系统中会引入旋转分离器^[12-13],令水体旋转产生向心力从而把颗粒性物质集中于水池中央,然后通过中央排污的方式收集含固性养殖废水做无害化处理。沉淀处理一般可将粒径大于100 μm的废物去除,而具体的沉淀时间则要视养殖废水中大型颗粒物的数量而定。

(2) 泡沫分离 对于悬浮态的细微颗粒污染物可应用气浮的方法进行泡沫分离^[14-16],在20世纪70年代气浮技术在工业废水处理中开始广泛应用。泡沫分离器可设计为圆筒状或迂回管状,将气体注入其中产生大量的气泡,气泡产生的表面张力将废水中的溶解态、悬浮态的有机污染物吸附其上,并随着上升作用把污物举出水面形成泡沫,再由顶部的泡沫收集器收集泡沫,最后做集无害化处理。有研究表明该项技术聚集污物的含固率可达3.9%^[7]。此外,该技术不但有效去处悬浮态的有机污染物,还可向水体中注入一定的氧气,以助水体中耗氧物质的氧化,若要增强氧化效果,还可在所注入的气体中添加臭氧成分。

(3) 生物净化 养殖过程中投入的饲料及对虾残体、排泄物直接导致废水中氨氮、亚硝氮、硝氮、磷酸盐等物质大量存在。生物净化主要是利用微生物如芽孢杆菌、光合细菌、硝化菌、反硝化菌等吸收、降解水体中的有机质和氮、磷营养盐^[17-18]。也有个别系统中引入了滤食性贝类、江篱等一些大型藻类以增大吸收效率^[6]。

在应用微生物技术净化养殖废水时一般会把微生物进行包埋固定化处理,把菌种固定于一个适宜生长、繁殖的固体环境中^[19-20],使之成为生物膜、生物转盘、生物滤器、生物床等形式^[17,21-26],以提高生物量、增强微生物活性,从而达到快速、高效降解废水中的有机质、氨氮、亚硝氮、磷酸盐等污染物的目的。但笔者认为生物净化系统应该借鉴IT行业的设计理念采用模块化设计。首先,从自然界中筛选高效菌种,或将分子生物学技术引入微生物工程中人工构建超级菌种,制备高效微生物水质净化模块;其次,筛选构建净化效率高、环境兼容性强的藻类模块;最后,将微生物技术与藻类技术有机结合,形成一个有效的菌藻生态平台,充分利用不同生物物种的生物学特性,使生物净化系统的净化效率最大化。

2.2 水质监测

对养殖水质的监测为调整工厂化养殖系统的管理提供参考依据。由于对虾养殖的规格变化,养殖系统中各模块运作的独立性,再加上养殖水质指标变化的渐变性,决定了水质检测点分散,检测时限宽的特点。因此,在有的对虾工厂化养殖系统中会配置自动采样检测的多参数检测系统^[7],通过对管路内水体的水质参数检测,实现养殖系统内的自动巡测、循环或阶段性监测。有的简易式工厂化养殖系统为降低建设成本,也可采用人工阶段性水质采样跟

踪的方法,对养殖系统中各模块进、出水的水质参数进行监测,根据既定的水质参数参考规范及时对整个工厂化养殖系统进行合理调节,以达到平稳、高效的生产目的。

3 对虾工厂化养殖的模式

目前学者们把工厂化养殖的方式大致分为:流水养殖、半封闭循环水养殖、全封闭循环水养殖3种养殖形式。流水养殖全过程均实现开放式流水,用过的水不再回收处理,流水交换量为每天6~15次^[1];半封闭循环水养殖方式对养殖用水不是完全开放,而是对部分养殖废水经沉淀、过滤、消毒等简单处理后再流回养殖池重复使用^[27-28];全封闭循环水养殖方式的养殖用水经沉淀、过滤、去除可溶性有害物、消毒等预处理,再根据不同养殖对象不同生长阶段的生理要求,进行调温、增氧和补充适量的新鲜水,再重新输送到养殖池中,反复循环使用^[29-30]。有的甚至还附有水质监测、自动或半自动控制仪等。

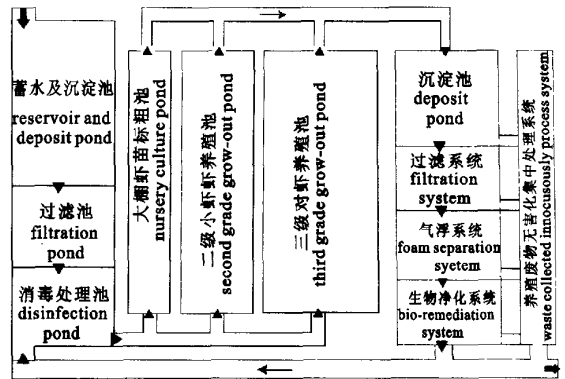


图1 对虾工厂化养殖综合平面示意图

Fig.1 Comprehensive industrial shrimp cultural system

图1所示,养殖用水经沉淀、过滤、消毒、控温、增氧等预处理后进入对虾养殖池,对虾根据不同规格在不同的养殖池中进行流程式养殖,各养殖池中均配备了增氧、控温设施以确保对虾养殖的全年性生产。养殖过程中排出的废水经过由沉淀池、过滤模块、气浮模块、生物净化模块组成的水处理系统净化后,可根据需要回流到养殖池内循环使用,也可作部分回收使用。至于对废水处理系统无法净化的小部分废物则可集中至“养殖废物无害化集中处理系统”中进行处理,待达到相关的排放标准后再行排出。整个养殖过程切实落实无公害生产管理的要求。该系统模式还可根据地域、气候、生产条件等差异进行地区特色化完善,如华南海域水温高、光照时间长、海域中生物资源丰富,相对北方地区对虾养殖生产的时间较长。因此,可

根据其特点充分利用自然资源,减少控温设施的运作降低养殖能耗,引入微生物、浮游藻类、大中型水生植物等元素,从而构建一个适宜南方特色的环境友好型工厂化对虾养殖模式。

参考文献:

- [1] 樊祥国. 我国工厂化养殖现状和发展前景 [J]. 中国水产, 2004 (8): 11-12.
- [2] 张秀梅, 李勋. 我国设施渔业的现状及发展前景 [C] // 中国水产学会. 世界水产养殖科技大趋势. 北京: 海洋出版社, 2003; 26-35.
- [3] 王克行. 南美白对虾工厂化养殖技术 (I) [J]. 齐鲁渔业, 2003, 20 (1): 47-48.
- [4] 花兆泰. 浅谈工厂化水产养殖中水处理设备的应用 [J]. 渔业现代化, 2003 (3): 23-24.
- [5] RONNEY E A, ERIC J W. Filtering myxobolus cerebralis triactinomyxons from contaminated water using rapid sand filtration [J]. Aquac Engin, 2003, 29 (3/4): 77-91.
- [6] 慕峰, 臧维玲. 养殖用水净化处理技术及其应用 [J]. 水产科技情报, 2005, 32 (3): 117-120.
- [7] 张明华, 杨菁. 海水工厂化养殖水处理系统的装备技术研究 [J]. 海洋水产研究, 2003, 24 (2): 30-34.
- [8] STEVEN T S. Ozonation and UV irradiation - an introduction and examples of current applications [J]. Aquac Engin, 2003, 28 (1/2): 21-36.
- [9] 臧维玲, 王永涛, 戴习林, 等. 河口区室内幼虾养殖循环水处理技术与模式 [J]. 水产学报, 2003, 27 (2): 151-157.
- [10] MARTIN S T, GRAHAM A G. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems [J]. Aquac Engin, 2003, 29 (3/4): 125-137.
- [11] ASBJØRN B, MARTIN G, ANDERS N, et al. A newly developed oxygen injection system for cage farms [J]. Aquac Engin, 2006, 34 (1): 40-46.
- [12] JAYEN P V, BRIAN J L, MICHEL F C. Design methodology for the swirl separator [J]. Aquac Engin, 2005, 33 (1): 21-45.
- [13] JOHN D, STEVEN T S. Solids removal from a coldwater recirculating system - comparison of a swirl separator and a radial-flow settler [J]. Aquac Engin, 2005, 33 (1): 47-61.
- [14] SHULIN C B T, JAMES J B, DANIEL J A, et al. Modeling surfactant removal in foam fractionation: I - Theoretical development [J]. Aquac Engin, 1994, 13 (3): 163-181.
- [15] SHULIN C B T, JAMES J B, DANIEL J A, et al. Modeling surfactant removal in foam fractionation: II - Experimental investigations [J]. Aquac Engin, 1994, 13 (3): 183-200.
- [16] SUZUKI Y, MARUYAMAA T, NUMATAA H, et al. Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: towards zero emission [J]. Aquac Engin, 2003, 29 (3/4): 165-182.
- [17] LEONARDA N, GUIRAUDA J P, GASSETB E, et al. Bacteria and nutrients - nitrogen and carbon - in a recirculating system for sea bass production [J]. Aquac Engin, 2002, 26 (2): 111-127.
- [18] 单宝田, 王修林, 赵中华, 等. 海水工厂化养殖废水处理技术进展 [J]. 海洋科学, 2002, 26 (10): 36-38.
- [19] SAUTHIER N, GRASMICK A, BLANCHETON J P. Biological denitrification to marine closed aquaculture system [J]. Water Res, 1998, 32 (6): 1932-1938.
- [20] SHANABLEH A, HIJAZI A. Treatment of simulated aquaculture water using biofilter subjected to aeration/non-aeration cycles [J]. Water Sci & Tech, 1998, 38 (8/9): 223-231.
- [21] FABIANO L T, PAULO C A, WILSON W, et al. Importance of biofilm for water quality and nourishment in intensive shrimp culture [J]. Aquac, 2002, 203 (3/4): 263-278.
- [22] YOUSEF S A H, AFTAB A, AFAQUE ALAM M, et al. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia [J]. Aquac Engin, 2003, 29 (3/4): 139-154.
- [23] TSENG Kuofeng, WU Kuolin. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system [J]. Aquac Engin, 2004, 31 (1/2): 17-30.
- [24] LING Jian, CHEN Shulin. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters [J]. Aquac Engin, 2005, 33 (2): 150-162.
- [25] JUDITH B, RICHARD L, MICHAEL S, et al. A waste effluent treatment system based on microbial mats for black sea bass *Centropristis striata* recycled-water mariculture [J]. Aquac Engin, 2004, 31 (1/2): 78-82.
- [26] 宋德敬, 薛正锐, 陈庆生, 等. 海水工厂化养鱼水处理系统工程的研究 - 工艺流程、综合气浮、接触氧化池 [J]. 海洋水产研究, 2002, 23 (2): 49-52.
- [27] JASON M C, TZACHI M S, JOE M F, et al. Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *Litopenaeus vannamei* using limited discharge and biosecure management tools [J]. Aquac Engin, 2005, 32 (3/4): 425-442.
- [28] STEVEN T S, JOHN W D, THOMAS B W, et al. A partial-reuse system for coldwater aquaculture [J]. Aquac Engin, 2004, 31 (3/4): 157-181.
- [29] 张庆文, 田景波, 黄滨, 等. 对虾封闭循环式综合养殖系统的规划设计 [J]. 海洋水产研究, 2002, 23 (4): 29-34.
- [30] 梁文, 薛正锐. 封闭式循环水养殖牙鲆鱼技术初步研究 [J]. 海洋水产研究, 2002, 23 (4): 35-39.