

水产微环境养殖概念及技术内涵

徐永健^{1,2}

(1.宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832; 2.应用海洋生物技术教育部重点实验室, 浙江 宁波 315832)

摘要: 从当前水产养殖产业中存在的主要问题入手, 分析了宏观环境调控的不足, 提出了微环境养殖概念. 养殖系统中的微环境包括系统中边角区的微小环境和生物体周边的微小环境. 微环境养殖是指调控养殖系统中这2类微环境的质量, 使其适宜于养殖生物的生长和个体发育. 养殖微环境调控是养殖过程中宏观环境调控的必要补充, 通过对系统微环境的有效调控, 最终使得所有养殖生物都生活在其最适宜的环境条件中. 微环境养殖技术是一种精准养殖技术, 其目标是使水产养殖可持续发展, 同时充分考虑养殖生物的福利. 发展微环境养殖技术, 当前应重点开展以下研究: 养殖设施新材料、养殖介质运动规律、微梯度差异的浓度-时间-效应关系、微环境调控技术及效果评估等. 还应重点发展以下交叉学科: 养殖微生物生态学、养殖微环境工程、养殖动物微行为学、养殖动物心理学等, 以促进水产养殖学科和产业的发展.

关键词: 水产养殖; 微环境; 环境调控; 微生态

中图分类号: S9-0

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 04-0001-07

人工养殖的目的是充分利用养殖空间, 在较短时间内生产出大量优质安全的产品, 获得较高的经济效益. 在相关理论指导下, 先进的技术研究与开发是养殖活动顺利开展的前提和保障. 经过40多年的研究与实践, 我国的水产养殖产业取得了辉煌成就, 养殖产量和效益都非常可观, 并吸引了大量资本进入该行业. 但在繁荣的背后, 也不能忽视当前养殖中存在的一些制约生产效益和产业进步的问题. 这些问题可归结为3个方面: 养殖生物生长缓慢或生长参差不齐影响产量; 养殖生物个体发育迟缓或不齐整影响品质; 养殖生物病害频发等影响成活率和效益. 本文将对为何出现这些问题, 生产中采取的措施为何不能完全解决上述问题, 核心问题是什么以及当前是否有相关的新理论来指导和解决这些问题进行分析.

1 目前养殖产业存在的主要问题分析

1.1 养殖系统中生物生长的个体差异

养殖系统内的生物群体中往往会出现个体大

小的差异, 随着养殖时间延长, 这种差异愈发明显, 进而导致整个群体的成活率和生长速度下降^[1-3]. 内在原因: 有人认为是由于养殖群体中存在社会等级, 地位高的会压制地位低的生物生长, 导致群内个体大小分化^[4-5]. 分级养殖被认为可以消除社会等级所造成的负面影响^[5], 但也有研究指出分级养殖并不能明显改变这种分化^[6-8]. 还有人认为, 在资源有限时, 社会地位低的个体得到较少能量, 但却需支出更多能量用于应付竞争和环境胁迫^[9], 导致群体生长分化^[10-11], 而当适宜条件恢复后一般会补偿性生长^[12-13]. 这些结果表明生物群体中社会等级的影响是存在的, 但环境胁迫对生长的影响是关键, 受胁迫较小的生长快些, 反之则生长抑制明显. 当胁迫减少后, 生长则会得以补偿.

1.2 养殖系统中生物个体发育不同步

人工养殖往往造成养殖生物的性腺发育缓慢, 出现不同步现象^[14], 养殖生物性腺发育及抱卵量与野生状态差异很大^[14-16]. 这种情况对于甲壳类、贝类和一些鱼类(如鲟)等以生殖腺发育程度作为

收稿日期: 2018-09-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41276123); 教育部科学技术研究重点项目(212070); 宁波市自然科学基金(2017A610282); 宁波大学学科开放基金(XKZSC1508).

作者简介: 徐永健(1975-), 男, 浙江台州人, 教授, 主要研究方向: 动物行为生态与养殖技术. E-mail: xuyongjian@nbu.edu.cn

品质标准的养殖产品来说,极大地影响了养殖的经济效益及后续幼体的人工繁殖生产^[16-18]。生物性腺发育与环境因子(光、温、盐及营养等)密切相关^[19-20]。人工养殖系统中,养殖生物常处于系统中不同的水层和位置,生物的活动也常由于高密度等原因被极大地限制,不同的水层位置有着不同的环境特性,如光强、光质,甚至温度、盐度、pH 等都会有一定差异,使生物处于非适宜生产条件下,这种胁迫状态会逐渐积累从而导致不同生物个体间的性腺发育速度有快有慢,影响品质。

1.3 养殖系统中的生物病害

病害问题已成为制约养殖产业发展的主要因素^[21]。病害是在水产动物的饲养过程中由各类致病微生物爆发性增殖引起的,因此其发生与养殖环境密切相关。养殖系统中,养殖生物、病原(致病微生物)与养殖环境是相互作用、相互制约的。良好的环境可以抑制病原滋生,健康的生物可以抵抗病原侵袭。当养殖环境恶化(如有机物、氨氮、亚硝氮、硫化氢等有害物质增多),虽然养殖生物对恶化环境有一定的适应能力,但其生长速度、摄食能力和抗病能力等都会逐渐下降^[22-23],而病原数量在增多,感染力在加强,最终导致病害发生。健康养殖理念的核心就是改善和优化养殖环境,消除养殖中的不良效应,减少病害发生,提高产品质量^[24]。如何改善和优化养殖条件,目前仍在探索^[25]。

2 制约产业发展的环境因素分析

上述养殖问题的形成,主要受养殖系统中环境胁迫所致^[26]。环境胁迫已成为水产养殖面临的一个重要问题,人工养殖系统中或多或少都存在一些环境胁迫^[27-28]。减少养殖系统的环境胁迫就是要“进行养殖环境调控,改善和优化养殖环境”。

养殖环境调控包括水质调控和底质调控,常用的调控技术有换水、充气和循环流水、微生物制剂、多营养级综合养殖及种植养殖结合等。前3种方法在高密度集约化设施养殖中有广泛应用。换水能较好地控制养殖水质,是养殖后期的有效调控手段之一,但在重视养殖业环保的当下,不再提倡该方法。微生物制剂能加速养殖污染物质的降解,部分产品还有稳定养殖生物体内外环境的功能^[29],但施用时对水体条件有要求,如溶氧充足,

否则会造成低氧胁迫。增氧机的发明快速地促进了池塘养殖的发展^[30],与充气作用类似,在实现水体增氧、上下水体混合及促进氨氮等有害物质转化和挥发方面起到了很好的作用^[30-31],进而在工厂化设施养殖中得以大力推广,结合循环流水等技术,极大地提高了设施养殖的单位产量和效益。上述调控措施的应用实现了养殖水质指标的合理化,并保持养殖水质的相对稳定,基本满足了养殖生产的需求,达到了高产的目的,提高了养殖效益。

尽管加强了养殖系统内的环境调控,如增加了充气密度,加大了循环水量与速度等,但是随着养殖集约化程度不断提高,一些养殖问题依然存在并尤为严重^[32-33]。在现有调控模式下,养殖系统中大部分区域环境质量良好,但还有小部分区域难以调控到,这些区域环境较为恶劣,很可能是导致目前养殖系统中诸多问题无法解决的关键所在。

作者曾模拟了设施养殖系统进行初步研究,考察了这一小部分区域与系统中大部分区域间水质环境的差异性,以及环境因子梯度差异对养殖生物的影响。结果发现:随着养殖时间延长,一些重要的养殖水质指标(如 DO、pH、NH₄-N 及异养菌总数等)在系统内不同小环境间的差异越来越明显,譬如在养殖容器的角落区和边边交汇区(合称边角区)DO 和 pH 下降,而 NH₄-N 浓度和异养菌数丰度上升,与其他区域间的差异非常显著。这种差异性可通过充气或循环流水等方式得到一定程度的削弱和控制,但并不能完全消除,这样的区域称为胁迫区。当养殖生物放养密度较高时,部分养殖生物会出现在胁迫区,随着放养密度提高,在胁迫区中出现的时间和机率都会逐渐增加。经分析,海洋青鳉(*Oryzias melastigma*) 24 h 内出现在胁迫区的时间超过 20%(或出现机率>20%)时,该鱼的生理状态就会发生变化,如抗胁迫酶类(超氧化歧化酶 SOD、过氧化氢酶 CAT、酸性磷酸酶 ACP)的活性和丙二醛(MDA)含量增加,消化酶类(淀粉酶、脂酶、蛋白酶)活性减小。进而,鱼体表面微生物群落组成也发生改变。这种改变将导致鱼体免疫力下降,增加对疾病的易感性^[22-23,34],即使不发生病害,也可能影响到鱼体的生长和发育。而有关系统内养殖环境存在的差异性及其差异微梯度变化对养殖生物的影响研究,目前鲜有工作涉及。

另一方面, 养殖技术发展也掩盖了系统中存在的环境问题, 就养殖成活率而论, 我国现有条件下养殖生物成活率都不高, 如黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)4~6成, 加州鲈(*Micropterus salmoides*)3~4成, 凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)大棚水泥池养殖成活率3~7成, 梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、青蟹(*Scylla paramamosain*)等甚至不足1成。之所以有较高养殖产量, 是因为生产过程中投放了大量的苗种, 现有的调控技术保证了一部分养殖生物的成长, 得以有较高养殖产量。但低养殖成活率问题始终存在, 进一步提高苗种投放量也难以再增加产量, 反而会加剧环境问题; 另外还增加了养殖成本, 加剧上游苗种产业的生产压力, 造成企业没有精力进行种质改良提升。

3 解决环境问题的方法思考

养殖技术的发展和养殖设施的逐步完善, 促进了养殖产量和养殖效益的不断提升, 也掩盖了养殖过程中始终存在的环境问题, 归根结底会影响养殖效益。而现有养殖环境调控技术遇到了瓶颈, 需要有新的理论指导, 发展新的技术, 进一步促进养殖产业的进步与发展。

3.1 微环境养殖概念的提出

从方法论上看, 宏观调控解决了养殖系统中大部分区域的环境问题, 因此现在的主要矛盾和任务是解决边角区等小部分区域的环境问题。这小部分区域有其自身的特点, 前面的分析也表明难以直接采用宏观方法解决该区域环境问题, 因此, 需要进行相关方法和技术的研究。从解决全系统的环境胁迫问题看, 后者是对前者的补充和完善, 两者是统一的, 服务于健康养殖。

借鉴其他学科经验, 对于新出现的科学问题, 一般在归纳总结前人工作的基础上, 先形成理论用于指导有关方法和技术的发展和完善。如, 1974年, 美国生态学家 Lawrence Pomeroy 提出了微生物食物环概念, 随后几十年中, 全世界的海洋科学家在该理论的指引下, 发展和完善了大量关于海洋微生物研究的方法和技术, 形成了一系列新成果、新发现, 极大地推动了海洋生态学和海洋科学的发展。1982年, Colwell 实验室发现有些微生物在正常试验中能存活但不能扩繁培养, 其后发现这

样的微生物普遍存在, 便提出了不可培养微生物(VBNC)概念, 促使大家对这一类群生物开展深入研究, 推动了微生物学的发展, 也使得人们知道对自然界的认识还非常有限。因此, 推动研究深入快速发展的步骤为: 提出概念, 指导实践和研究, 完善理论, 用于实践, 解决问题。在此, 本文提出微环境养殖概念, 用于指导养殖问题的解决。

微环境养殖是指调控养殖系统微环境中的各项环境指标, 使其适宜于养殖生物的生长和发育, 最终达到所有养殖生物个体都生活在其最适条件下的一种养殖方法。采用微环境养殖方法进行养殖的技术, 叫做微环境养殖技术。微环境养殖技术是一种精准养殖技术, 其目标是使水产养殖产业可持续发展, 同时充分考虑养殖生物的福利。

3.2 微环境的范畴

本概念的微环境包括2层意思: 一是指养殖系统中边边角角等区域的微小环境; 二是指养殖生物体周边的微小环境。微环境的概念在其他学科提出较早, 环境科学和生态学中的微环境指的是小环境, 其界限模糊, 大到社区、居室, 小到生物个体表面、生物膜或材料表面膜上的生态环境; 生物学和医学中的微环境指的是细胞间质及其中的体液成分, 参与构成细胞生存的环境^[35]。

微观环境的深入研究, 对学科建设和产业发展都起到了很好的促进和推动作用, 如肿瘤微环境研究。早期肿瘤的预防与治疗, 仅从宏观上如个体体质、饮食等分析探讨, 难以做到有效治疗^[36]。后来通过对肿瘤微观环境的研究, 如肿瘤组织层次、细胞层次和分子层次的研究^[35,37], 明确了不同个体微环境对肿瘤的组织、细胞和分子调控的影响机理, 逐步发展和形成了精准治疗策略^[38], 促进了精准医学分支学科的建立^[39-40], 并形成了健康微环境概念和微环境保健理论, 而微环境保健产业是当前发展最快的产业之一^[40-41]。

水产养殖学上, 基于现有理念提倡的生态环保和产品健康安全, 必须解决系统内上述2类微环境胁迫所引起的问题, 即应从养殖系统的微观环境问题入手, 进行养殖微环境的有效调控。因此, 本概念的养殖微环境既涉及养殖系统中的边角区域, 也包括生物体表面周围区域; 既涉及养殖介质的生态环境, 也涉及养殖生物的生理生化环境等。

3.3 养殖生物健康与养殖微环境间的关系

对养殖生物而言,摄食、呼吸和体表接触等是影响其健康状况的主要途径,因此水环境状况是影响水生生物健康的最主要因素。有关报道很多,如低氧不利于水生生物正常生长,会造成生物生长发育缓慢,直接造成养殖产量下降^[42],还会增加对病原的易感性^[43];高氨氮会导致鱼类的毒血症,引起鳃、肾、肝、脾及甲状腺等器官组织病变^[28,44];高或低 pH 值都会造成生物免疫能力下降、生长受抑制^[45];而温盐不适会造成鱼类生化组分和抗氧化酶、溶菌酶等活力变化,影响摄食量和免疫力^[46]。

环境胁迫还通过影响养殖生物的共附生细菌来改变其健康状况,包括对体表(皮肤、鳃)及体内(肠道)细菌群落的影响,而这些菌群与宿主间存在着非常密切的关系^[47-52],这种关系到目前还未完全探明^[47,49,51]。菌群组成的改变可能与养殖生物致病或生理性状改变等有直接关系^[47,49,52],因此共附生微生物生态的调控是当前生态健康养殖的主要内容之一^[48-50]。而生物共附生菌群落的改变,可能就来自于环境变化(环境胁迫)的影响^[47-48,52]。

3.4 微环境养殖的意义

微环境养殖概念的核心是保持养殖系统中微环境质量安全,保证养殖生物健康。对养殖生产而言,用科技手段管好影响养殖生物健康的途径,将有利于提高产品品质和养殖效益。

现有的方法和技术,还难以直接对系统中生物体表微环境进行有效调控,其操作难度大,生产上难以实现。但是,实现微环境调控也有有利条件,如现有产业拥有良好的宏观调控方法和技术积累,养殖系统中绝大部分区域的环境质量是优良的,有良好的技术和方法保证初始养殖生物是健康的等等。现阶段重点是要开展养殖系统边角区微环境的调控研究,使得整个系统无环境死角,始终保持优良的状态,哪怕养殖生物在这些区域长时间滞留,也不会影响其体表微环境,那么养殖生物就会保持良好状态。随着方法和技术的发展,今后还可开展直接针对养殖生物体表微环境的调控,毕竟每个生物个体是不同的,在系统中都会有一个最有利于生长的合适位置(环境条件)。

可以说,开展微环境养殖是打通了人工养殖的“最后一公里”,将极大减少影响养殖生物健康

的不良因素,提高养殖产品的品质和养殖的效益。

4 微环境养殖的技术内涵

水产养殖是在人工生态系统中的生物生产,从水产科学的研究进程来看,前期研究重点关注养殖系统的宏观调控,随着养殖集约化程度提高,现已发展为宏观与微观研究并重。本文所提及的微环境养殖方法,在宏观上可用于改善养殖技术和完善养殖设施,于微观处让系统中各种环境因子的差异减少或不存在,尤其是养殖生物周边微环境中的各项条件指标都适合于生物的个体生长。要做到这点,当前需重点解决一些困难。

4.1 重点研究领域

(1)养殖介质运动规律(微流体动力学),尤其是不同介质间接触区域内的运动规律研究非常缺乏,难以给养殖技术和养殖设施的改进和完善提供相关有效的参数。这方面研究主要涉及水介质在不同调控作用下的运动规律,以及水介质与养殖设施间的相互作用关系,尤其涉及在系统的边角区及生物体周边微环境中的相互作用,重点包括水的交换及水质各项指标的分布与扩散规律等。另一方面,还涉及养殖生物的活动(个体和群体运动,目的运动和无意识运动)等对水介质的影响及对水质分布与扩散的影响。

(2)养殖材料。构建养殖设施的材料科学研究不足,影响高效养殖设施的改进与完善。如有关防污损,降摩擦,增流速,或吸收氨氮等有害物质,释放有益物质(如氧气),以及抗病原生物等方面材料物质的研究还非常缺乏。

(3)养殖系统中微环境的多样性、水质微梯度变化等与养殖生物之间的浓度—时效关系研究缺乏,包括水环境化学的多样性及存在的微梯度差异、水生微生物的多样性及存在的微梯度差异、水环境物理特性的多样性及存在的微梯度差异,以及各因素间相互关系特性等,还涉及有效的取样方法和技术、监测与分析技术和有效评估技术等。

(4)微生物与养殖生物健康关系研究不足。在现有病害研究的基础上,进一步发展养殖生物体表及体内微生物组成的快速检测方法和技术,并探讨体内外微生物组成变化与养殖生物的生理、行为、生长等的互作关系。

(5)微环境调控效果评估. 有效、灵敏、便捷的评估指标的开发与应用, 能极大地推进微环境养殖技术的发展以及指导一线的养殖生产, 同时也能在实践中加以验证和优化.

4.2 重点交叉学科

针对上述重点研究领域, 应当重视一些交叉学科在养殖领域的应用.

(1)养殖微生物生态学. 环境胁迫通过微环境中水质理化因子的微梯度差异及微生物群落变化来实现对养殖动物的影响, 如抑制生物生长发育及引起疾病等^[47,53]. 然而, 对养殖系统微环境中的微生物生态学所知甚少且研究缺乏. 环境因子、饵料及微生物制剂等外界条件对边角区微环境和养殖生物周边微环境中的水质和细菌群落都可产生影响. 在集约化养殖系统中, 投喂的大量饵料、生物产生的大量废物等都会成为异养菌或条件致病菌的良好培养基, 尤其对受环境胁迫而生理机能有所下降的养殖生物, 就可能引起感染而发病^[24-25]. 有关内在的机制所知甚少, 亟需开展研究^[54-55].

(2)养殖动物微行为学. 由于存在水样采集和分析技术限制及养殖生物干扰等影响, 难以发展快捷、灵敏、有效地判断微环境调控效果的方法. 生物监测能综合各方面信息^[56], 养殖生物的良好生长也是养殖的根本目的. 因此, 通过养殖生物对调控效果进行监测与判断是最好的选择. 动物行为受其体内外环境的影响, 是其生长状态好坏的综合表现. 观察养殖动物的行为, 尤其是微行为的变化, 如呼吸节律、运动节律、感觉(包括警觉)、摄食等行为的动作组成, 分析其健康与胁迫下的组成动作的变化特征, 可应用于判断养殖环境质量状况, 评估微环境调控与微环境养殖的效果.

(3)养殖微环境工程. 宏观环境调控手段在粗放或半集约化的水产养殖中发挥着重要的作用, 如预防环境胁迫、防控疾病发生等^[30]. 但在高度集约化养殖系统中, 由于有关知识储备欠缺, 如养殖系统的流体力学、养殖设施的材料科学等, 宏观调控难以全面调节和控制系统内的环境. 因此, 有必要研究集约化养殖系统中各种环境胁迫因子在生物生长、发育及病害发生过程中的贡献及大小, 以确定关键的胁迫因子. 在明确宏观调控的作用范围与贡献的同时, 发展宏观调控以外的微观调

控, 研究微观与宏观调控结合, 最大限度地保障养殖生物的适宜环境条件与福利. 在微观调控方法和技术研究上, 还要引进其他学科的先进技术.

(4)养殖动物心理学. 发展养殖动物的心理学研究, 对于理解养殖类群中生物与生物间的相互关系, 如社会等级, 比较不同等级生物间的行为差异特性, 通过行为组成及微行为比较对不同等级生物的心理过程进行分析; 其次, 对养殖动物的习惯和行为及其适应生存的功能进行观察, 分析为何有些生物会频繁地出现在容器边角区, 且形成了习惯性行为, 使自身遭受更多胁迫压力等.

参考文献:

- [1] Paller M H, Lewis W M. Effects of diet on growth depensation and cannibalism among intensively cultured larval striped bass[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1987, 49:270-275.
- [2] Katavic I, Jug-Dujakovic J, Glamuzina B. Cannibalism as a factor affecting the survival of intensively cultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fingerlings[J]. Aquaculture, 1989, 77:135-143.
- [3] Baras E, Maxi M Y J, Ndao M, et al. Sibling cannibalism in dorada under experimental conditions: II. Effect of initial size heterogeneity, diet and light regime on early cannibalism[J]. Journal of Fish Biology, 2000, 57:1021-1036.
- [4] Koebele B P. Growth and the size hierarchy effect: an experimental assessment of three proposed mechanism; activity differences, disproportional food acquisition, physiological stress[J]. Environmental Biology of Fishes, 1985, 12:181-188.
- [5] Huntingford F A, Metcalfe N B, Thorpe J E. Social dominance and body size in Atlantic salmon parr, *Salmo salar* L[J]. Journal of Fish Biology, 1990, 36:877-881.
- [6] Wallace J C, Kolbeinshavn A G. The effect of size grading on subsequent growth in fingerling Arctic charr, *Salvelinus alpinus* L[J]. Aquaculture, 1988, 73:97-100.
- [7] Kamstra A. The effect of size grading on individual growth in eel, *Anguilla anguilla*, measured by individual marking[J]. Aquaculture, 1993, 112:67-77.
- [8] Dou S Z, Masuda R, Tanaka M, et al. Size hierarchies affecting the social interactions and growth of juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Aquaculture, 2004, 233:237-249.
- [9] Metcalfe N B. Intraspecific variation in competition

- ability and food intake in salmonids: Consequences for energy budgets and growth rates[J]. *Journal of Fish Biology*, 1986, 28:525-531.
- [10] Ryer C H, Olla B L. Growth depensation and aggression in laboratory reared coho salmon: The effect of food distribution and ration size[J]. *Journal of Fish Biology*, 1996, 48:686-694.
- [11] 王岩. 食物水平和初始体重对杂交罗非鱼生长和个体生长分化的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2):237-240.
- [12] Nicieza A G, Metcalfe N B. Growth compensation in juvenile Atlantic salmon: Response to depressed temperature and food availability[J]. *Ecology*, 1997, 78:2385-2400.
- [13] 王丽华, 黄国强, 田思娟, 等. 盐度对褐牙鲈幼鱼生长的影响及其在盐度胁迫后的补偿生长[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(4):615-621.
- [14] Wu X G, Cheng Y X, Zeng C S, et al. Reproductive performance and offspring quality of wild-caught and pond-reared swimming crab (*Portunus trituberculatus*) broodstock[J]. *Aquaculture*, 2010, 301(1/4):64-78.
- [15] Wu X G, Cheng Y X, Zeng C S, et al. Reproductive performance and offspring quality of the first and the second brood of female swimming crab, *Portunus trituberculatus*[J]. *Aquaculture*, 2010, 303(1/4):94-100.
- [16] 乔振国, 王春琳, 房文红, 等. 海水蟹类安全生产技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [17] 刘文广, 李琪, 高凤祥, 等. 长牡蛎繁殖周期、生化成分的季节变化与环境因子的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(3):88-93.
- [18] 吴旭干, 汪倩, 楼宝, 等. 育肥时间对三疣梭子蟹卵巢发育和营养品质的影响[J]. *水产学报*, 2014, 38(2):170-182.
- [19] Kim D H, Kim S K, Choi J H, et al. The effects of manipulating water temperature, photoperiod and eyestalk ablation on gonad maturation of the swimming crab, *Portunus trituberculatus*[J]. *Crustaceana*, 2010, 83(2):129-141.
- [20] 汪倩, 丰浪, 刘智俊, 等. 饲料中 DHA/EPA 对三疣梭子蟹肝胰腺组织结构的影响[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(15):147-149.
- [21] 相建海, 刘保忠. 重要海水养殖动物病害发生和免疫防治的基础研究[J]. *生命科学*, 2007, 19(4):396-399.
- [22] Goulden E F, Hall M R, Bourne D G, et al. Pathogenicity and infection cycle of *Vibrio owensii* in larviculture of the ornate spiny lobster (*Panulirus ornatus*)[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(8):2841-2849.
- [23] Chrousos G P, Gold P W. The concepts of stress and stress system disorders: Overview of physical and behavioural homeostasis[J]. *Journal of the American Medical Association*, 1999, 267:1244-1252.
- [24] 丁晓明. 对水产健康养殖的实践与思考[J]. *中国渔业质量与标准*, 2011(3):1-5.
- [25] 叶乃好, 庄志猛, 王清印. 水产健康养殖理念与发展对策[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3):101-104.
- [26] 李运涛, 相建海. 栉孔扇贝大规模死亡的原因探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6):21-27.
- [27] Seidman E R, Lawrence A L. Growth, feed digestibility, and proximate body composition of juvenile *Penaeus vannamei* and *Peuaeus mondon* grown at different dissolved oxygen levels[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1985, 16:333-346.
- [28] 藏维玲. 亚硝酸盐和氨对罗氏沼虾幼体的毒性[J]. *上海水产大学学报*, 1996, 25(5):15-21.
- [29] Zhu Z X, Deng S Z, Zhang L Z. Effects of compound probiotics on intestine and intestinal *Aeromonas hydrophila* of fish[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2016, 17(11):2622-2626.
- [30] 王武. 鱼类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] Stadmark J, Leonardson L. Greenhouse gas production in a pond sediment: Effects of temperature, nitrate, acetate and season[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1/3):194-205.
- [32] 赵法箴, 王群, 李健. 水产健康养殖与食品安全[C]. 全国学术年会农业分会论文集, 2005:15-17; 44.
- [33] 张福绥. 近现代中国水产养殖业发展回顾与展望[J]. *世界科技研究与发展*, 2003, 25(3):5-13.
- [34] Karunasagar I, Pai R, Malathi G R, et al. Mass mortality of *Penaeus monodon*, larvae due to antibiotic-resistant *Vibrio harveyi*, infection[J]. *Aquaculture*, 1994, 128(3/4):203-209.
- [35] Li H, Fan X, Houghton J. Tumor microenvironment: The role of the tumor stroma in cancer[J]. *Journal of Cellular Biochemistry*, 2007, 101(4):805-819.
- [36] 李秀丽, 杨志杰. 中医体质学与肿瘤的相关研究[J]. *世界中医药*, 2010(4):238-240.
- [37] Painter K J. Modelling cell migration strategies in the extracellular matrix[J]. *Journal of Mathematical Biology*, 2009, 58(4/5):511-543.
- [38] 郭俊超, 袁达. 我国肿瘤精准治疗的现状与思考[J]. *中华外科杂志*, 2016, 54(7):485-487.
- [39] Mirnezami R, Nicholson J, Darzi A. Preparing for precision medicine[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2012, 366(6):489-491.
- [40] 詹启敏. 精准医学: 我国医学发展的历史机遇[N]. *中国科学报*, 2015-12-22(7).

- [41] 陈斐, 齐心一, 戴悦, 等. 肿瘤微环境与肿瘤耐药的研究进展[J]. 生命科学, 2014, 26(10):991-997.
- [42] Allan G L, Maguire G B. Lethal levels of dissolved oxygen and effects of short-term oxygen stress on subsequent growth of juvenile *Peucaeus mondon*[J]. Aquaculture, 1991, 84:27-37.
- [43] Moullac L G, Soye C, Saulnier D, et al. Effect of hypoxia stress on the immune response and the resistance to vibriosis of the shrimp *Penaeus stylirostris*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 1998, 8:621-629.
- [44] 黄鹤忠, 李义, 宋学宏, 等. 氨氮胁迫对中华绒螯蟹免疫功能的影响[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(3):198-205.
- [45] Allan G L, Maguire G B. Effect of pH and salinity on survival, growth and osmoregulation in *Penaeus monodon* Fabricius[J]. Aquaculture, 1992, 107(1):33-47.
- [46] 王晓杰, 张秀梅, 黄国强. 低温胁迫对许氏平鲷补偿生长的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(4):566-572.
- [47] Annelies M D, Freddy H, Wim B. Columnaris disease in fish: A review with emphasis on bacterium-host interactions [J]. Veterinary Research, 2013, 44:1-27.
- [48] 冯敬宾, 胡超群. 海水鱼类共附生细菌群落研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30(10):2722-2734.
- [49] Francisca A B, Candis L R, Covadonga R A. Bacterial diversity and community structure of the intestinal microbiome of Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*) during ontogenesis[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2018, 41:494-505.
- [50] Li Y X, Yang P, Zhang Y J, et al. Effects of dietary glycine on the growth performance, digestion, intestinal morphology and bacterial community of juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* L.[J]. Aquaculture, 2017, 479: 125-133.
- [51] Ariadna S B, Itziar E, Jaume P S. Immunity to gastrointestinal microparasites of fish[J]. Developmental and Comparative Immunology, 2016, 64:187-201.
- [52] Felipe E R, Margareth O, Odd H R, et al. Intestinal bacterial community structure differs between healthy and inflamed intestines in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. Aquaculture, 2014, 420/421:262-269.
- [53] Hansen G H, Bergh Ø, Michaelsen J, et al. *Flexibacter ovolyticus* sp. nov., a pathogen of eggs and larvae of Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus* L.[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1992, 42(3): 451-458.
- [54] Zhang Y J, Li S, Gan R Y, et al. Impacts of gut bacteria on human health and diseases[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16:7493-7519.
- [55] Marjoram L, Bagnat M. Infection, inflammation and healing in zebrafish: Intestinal inflammation[J]. Current Pathobiology Reports, 2015, 3(2):147-153.
- [56] 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.

The concept of micro-environment aquaculture and its technical implications

XU Yongjian^{1,2}

(1.School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology of Ministry of Education, Ningbo 315832, China)

Abstract: Regarding the problems currently existing in the aquaculture industry, the insufficient environment regulation and control in cultured system were analyzed. In addition, the concept of micro-environment aquaculture was discussed in this article. The micro-environment culture refers to the regulation and control of the water quality within the micro-environmental areas in aquaculture system. It is developed to make the regulation and control more suitable for the growth and development needs of breeding organisms. There are 2 types of micro-environment in the aquaculture system, the peripheral areas of aquaculture facilities and the biological body. Micro-environment regulation and control are a necessary supplement to macro regulation and control in aquaculture process. With means of effective regulation of micro-environment, all aquaculture organisms will eventually live under their optimum environmental conditions. Micro-environment aquaculture technology is precision-breeding technology, which is aimed to make the aquaculture industry sustainable, with full awareness of the welfare of the breeding organisms.

Key words: aquaculture; micro-environment; environmental regulation and control; micro-ecosystem

(责任编辑 韩超)