

人工基质在对虾养殖中的应用

张家松¹, 陈亮亮^{1,2}, 冯震华¹, 段亚飞¹, 董宏标¹, 李 华¹, 刘青松¹

(1. 中国水产科学研究院 南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 目前中国对虾养殖业快速发展, 同时也伴随近海养殖水体日益恶化、抗生素和化学药物被滥用和水产品食品安全等一系列问题。这些问题严重制约着对虾集约化养殖的可持续发展, 因此选择一种更加健康、绿色和安全的养殖模式显得尤为重要。作者通过介绍人工基质这种新型水处理技术表面生物膜的结构和形成过程, 探讨了其功能性(水质调节、饲料补充和病害防治)机理, 对其在对虾养殖业中的实际应用做了展望。

关键词: 对虾; 人工基质; 生物膜; 机理
中图分类号: S969.35 文献标识码: A
doi: 10.11759/hyqx20150122002

文章编号: 1000-3096(2016)09-0135-05

在过去数十年中, 中国的对虾养殖业在规模和产量上都有了一个较大的发展, 养殖模式也从过去的低投入、低产出的粗放式养殖模式朝向高投入、高产出和精细管理集约化养殖模式转变。但是, 当前集约化养殖也存在着一些问题, 例如因其较高的养殖密度、单一的人工饲料投喂、相对简单的生态系统以及过低的环境承载力极易造成水体中有毒污染物的快速积累, 导致水质恶化、病害频发^[1-2]; 而抗生素的大量使用, 极易造成恶性循环, 不仅导致了耐药性病原菌的出现, 而且影响产品食用安全和环境安全^[3-5]。因此选择更加健康、绿色和安全的养殖技术就显得尤为重要。

人工基质, 也称人工水草, 属于生物-生态修复技术领域, 人为将耐酸碱、耐污、柔韧性很强的材料投入水中, 在载体表面形成从菌类、藻类到原生动物、后生动物的立体微生物生态系统, 提高污水处理的效果, 实现治理系统的高效性和稳定性^[6]。人工基质可有效富集水中的土著微生物, 利用微生物的吸收、分解和同化等作用, 去除部分氮磷等富营养物质; 同时利用微生物对污染物的降解作用, 可去除水体中的有机污染物、藻类甚至藻毒素等物质, 达到净化水质的目的, 从而广泛用于污水处理中^[7-9]。将人工基质用于对虾养殖中起步于 20 世纪 80 年代, 并取得了良好的效果^[10-13]。

1 人工基质表面生物膜的结构和形成过程

人工基质表面生物膜的形成是动态发展的过

程。生物膜的最初形成是一个物理-化学的自发反应过程, 这个过程在基质放入水体中的最初几秒到几分钟之内完成, 主要指水体中的悬浮物自发向基质表面靠近附着的过程。最初, 细菌群落开始在基质上

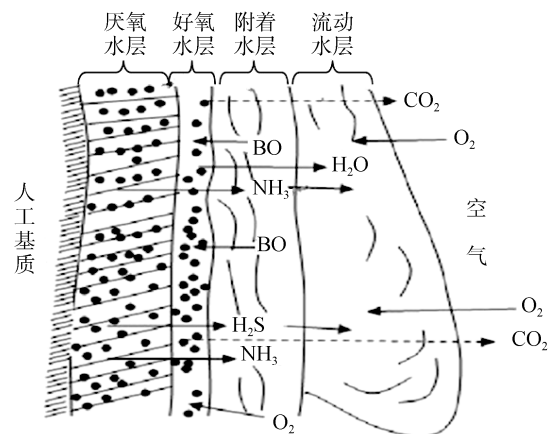


图 1 人工基质生物膜结构

Fig. 1 The structure of biofilm on artificial substrates

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-04-06

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD13B10); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2012YD02, 2012TS26); 广东省海洋渔业科技推广专项(A201208H01, A201201B04, A201301D02)

[Foundation: National Science and Technology Supporting Plan of the Twelfth Five-Year, No. 2011BAD13B10; Common Research Foundation for Central Institutions of China, No. 2012YD02, 2012TS26; Guangdong Provincial Special Fund for Marine Fisheries Technology, No. A201208H01, A201201B04, A201301D02]

作者简介: 张家松(1971-), 男, 江苏徐州人, 副研究员, 博士, 主要从事设施渔业养殖技术研究, 电话: 020-84451349, E-mail: jiasongzhang@hotmail.com

附着、生长、繁殖^[14]；随后便有藻类、真菌、原生动物、浮游动物和其他无脊椎动物等生物加入菌膜，最终形成多生物种类组成的动态变化的生物膜^[15]。

如图 1 所示，人工基质表面生物膜大致可以分为 4 层^[16]。自内向外分别是厌氧水层、好氧水层、附着水层和流动水层。在空气中的氧气进入养殖水体之后，伴随着水体的流动到达基质表面的附着水层，再经由附着水层向好氧水层内部扩散，最终被好氧层中生物的各种有氧代谢消耗殆尽。人工基质表面好氧水层、附着水层和流动水层之间的物质交换和能量流动最为频繁，养殖水体中的氨氮等有害代谢产物经流动水层进入到附着水层，进而扩散到好氧、厌氧水层被各水层中附着的细菌、藻类吸收利用，维护良好水质，为养殖生物的健康生长提供了良好的外部环境。

2 人工基质的材料选择及种类

在水产养殖中，人工基质的选择必须满足以下几个条件：(1)材料本身无害、无毒，不向水体中释放有毒、有害气体或物质，确保其不对养殖生物产生危害；(2)材料比表面积大、高孔隙率，布水布气性能好，并且不易堵塞；(3)材料具有一定的机械强度或者韧性，不宜被微生物降解，能够被重复利用；(4)价格低廉，容易获取^[17]。

目前，人工基质的材料种类包括无机类载体，如硅酸盐类、碳酸盐、碳纤维、矿渣、活性炭等；有机合成高分子基质，如聚丙烯、聚乙烯、PVC 管材等；天然可降解高分子基质，如稻草、壳聚糖、海藻酸钠和纤维素等^[17]。

3 人工基质在对虾养殖中的应用

3.1 吸收转化污物，维护良好水质

人工基质加入养殖水体之后，原有的以水-土界面为主的好氧-厌氧、硝化-反硝化条件扩大到整个水体，其基质表面迅速吸附水体中的悬浮颗粒物并逐渐形成一层生物膜状结构，膜中的细菌群落可以对吸附其上的残饵、粪便等有机碎屑进行彻底地分解利用，减少其在池塘底部沉积，厌氧代谢产生一些有害代谢产物^[15]。此外，膜上的附着藻类以及细菌，可从水体中吸收氨氮、硝酸盐等营养盐。薛松松^[18]挂设纳米材料的人工基质对养殖水体的氨氮、亚硝氮、无机磷去除率分别为 93.5%、69.3%、40.9%，且提高人工基质的面积可显著增加水处理的速率与效果。同样，Audelo-Naranjo 等^[19]使用阿科蔓生态基

(AquaMatsTM)作为人工基质，实验组的游离氨(NH₃)和铵离子(NH₄⁺)与对照组比分别降低了 22%和 39%，亚硝酸盐降低了 37.5%。江兴龙等^[20]在 6 口养殖对虾的池塘中设置专用人工基质(生物膜净水栅，专利号 ZL201120032516.6)，在养殖 135 d 期间，实验组的 pH、TAN、亚硝酸盐、无机氮和无机磷浓度分别显著低于对照组 7.5%、78.8%、76.2%、53.2%和 66.1%，DO 浓度极显著高于对照组 13.5%。同时检测发现，细菌总数、水体硅藻相对密度、藻类生物多样性指数分别极显著高于对照组 206%、173%、25.6%，藻类密度、蓝藻相对密度分别显著低于对照组 64.7%、70%，人工基质的使用改善和稳定了对虾养殖水质。

另一方面，硝化细菌、反硝化细菌在促进氮的循环中也起到了不可忽视的作用，但是这些细菌有其譬如世代长、生长慢、消化总碱度大、附着性强等问题^[17]。添加人工基质，可以增加硝化细菌和反硝化细菌的附着面积，有利于其快速生长、繁殖，并最终加速氨氮和亚硝酸盐氮等无机氮的转化、去除，大大降低了有害含氮代谢产物对养殖生物的毒害作用，达到净化水质的目的。吴伟^[21]等采用弹性生物填料为人工基质，水面下 50 cm 处每克填料上的各类微生物的数量在 30 d 左右达到峰值，细菌总数、真菌总数、氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌的数量分别为初始时的 1366、257、233、250 和 225 倍，其吸收转化氮的能力得到了极大的提高。

3.2 提供附着面积，增加养殖空间

人工基质提供了附着面积，改变了对虾在养殖系统内的分布。张波^[6]发现没有添加人工基质的对照组，对虾在桶底(59%~64%)、水体(14%~21%)以及桶壁(19%~23%)的比例保持相对稳定。然而，在添加有人工基质的实验组，人工基质上分布对虾的比例随着人工基质数量和养殖时间的增加而增加；而在桶底分布状况却刚好相反，随着人工基质数量和养殖时间的增加，桶底分布的对虾比例却逐渐减少。在 G5 组里，实验结束时，桶底的对虾分布比例最小(6%)，而人工基质上的比例却达到最大值(62%)。在整个实验期间，分布于桶壁(16%~23%)和水体(13%~21%)的对虾比例在实验组和对照组间没有显著性差异。对虾为底栖生物，其能否健康成长与底质的好坏密切相关。对虾在人工基质上的长时间停留，将大大减少其与池塘底质环境的接触时间，也减少其受到底质中病原菌的感染几率，这些都将是有益于其健康生长。这些研究结果也为今后探索进行高密度、集约

化的养殖管理提供了必要的理论基础和参考依据。

由于人工基质增加对虾的栖息场所,相应降低了对虾的养殖密度,减少了互相残食的几率和发生应激的概率,提高了对虾成活率。Sandifer等^[10]使用玻璃纤维片为人工基质,实验组对虾成活率(82%)极显著高于对照组(58%)。Audelo-Naranjo等^[19]在以阿科蔓生态基(AquaMats™)为人工基质,发现实验组对虾成活率(81.4%)也是显著高于对照组(75.0%),单位产量也有极显著差异(1.302 kg/m²和1.144 kg/m²)。Moss等^[22]、Otoshi等^[23]及Samocha等^[24]使用其他材质人工基质也都有相似的研究发现。

3.3 补充额外饵料,降低饲料系数

研究发现,人工基质表面生物膜的组成十分复杂,既包括饲料残饵、粪便等有机碎屑,也包含各种各样的藻类、浮游动物和浮游植物等,甚至会有原生动物的出现。这些丰富的生物群体本身就是一种优质的高蛋白质生物饵料,可以作为对虾额外蛋白来源^[25-27]。Audelo-Naranjo等^[19]发现使用阿科蔓生态基的实验组FCR仅为1.6,极显著低于对照组1.9。对人工基质上的生物膜营养成分分析,其中蛋白质占23%~30%,脂质占2%~9%,灰分占16%~42%和无氮浸出物占25%~28%,由此可见其营养之丰富^[25]。在零换水系统中,Epp等^[28]发现养殖凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)体内31%的氮来自饲料蛋白之外的氮源提供。Abreu等^[25]利用同位素示踪法进一步证实,对虾体内超过49%碳和70%氮可以来源于基质表面的生物膜。这些发现充分显示了生物膜作为对虾额外的蛋白补充来源的重要性。生物膜结构作为对虾食物来源不仅受外界环境影响小,而且还是24 h全天候的天然食物源,不会受到投喂时间、频次的限制,可随时为对虾所摄食利用。如此,在生产实践过程中,就可以尝试适当减少投喂量和投喂频率,促使生物膜中营养物质成分尽可能多的为对虾生长提供所必要的物质和能量,也在某种程度上促进了池中生物群体间食物链的延伸。

3.4 促进有益菌生长,抑制病原菌数量

致病菌通常适宜在厌氧、有机物含量丰富的水体中(大多为池塘底部)生长繁殖,人工基质的出现,大大降低了池塘底部的有机物沉积速率,加快了上下层水体间的交换频率,延缓了上下层水体间的分层^[15]。厌氧水层层的减少,有效降低了有害致病病原菌的生存空间,扩展了有益菌的生长、繁殖的空间。

从细菌种间竞争的角度来看,一旦水体中有益菌形成占位优势,则可以有效抑制水体中有害弧菌数量,降低对虾感染弧菌病的几率^[29]。Zhang^[12]检测发现,设置人工基质的对虾养殖水体弧菌数量(4.75×10³ CFU/mL)显著少于对照组(1.70×10⁴ CFU/mL)。江兴龙等^[20]也发现实验组的水体弧菌极显著低于对照组66%。

另有研究发现,生物膜上微生物群落除了对养殖水体中含氮代谢物具有较强吸收作用外,生物膜上的细菌和微藻也会产生特定的抗生素类化合物,可以有效地抑制致病菌的生长繁殖速度^[30-32]。江兴龙等^[20]发现人工基质表面生物膜上弧菌的检出率为零。Austin等^[33]发现斑节对虾(*Penaeus monodon*)摄食人工基质的生物膜后,能拮抗溶藻弧菌(*Vibrio alginolyticus*)、鳃弧菌(*V. anguillarum*)、副溶血性弧菌(*V. parahaemolyticus*)和创伤弧菌(*V. vulnificus*)的感染。当然,对于这些细菌和藻类产生抗生素类化合物的机制、目的和释放周期等原因尚不清楚,需要做进一步的研究。

4 小结与展望

人工基质应用于对虾养殖水体中,除了可以有效调控水质、减少换水之外,还兼具了饵料补充、为对虾提供栖息场所、降低致病菌感染几率等诸多作用,显示出人工基质在对虾水产养殖中具备着广阔的应用前景。但是,目前仍然有需要解决的问题,其中包括:

(1) 人工基质选材。正如前文所述,人工基质的材料很多,其中既有价格昂贵的商业人工基质产品如阿科蔓生态基,也不乏价格低廉的农业副产品,例如稻秆、甘蔗渣、竹竿等等。这些材料虽来源广、价格低、易获取,但是具体的使用方法、使用效果不一,没有统一使用规范。

(2) 人工基质使用量。受对虾规格、养殖密度、日常管理影响外,还受不同地域的环境、气候、养殖水体理化性质等诸多因素的影响,因此要想得到一个统一的、合乎实际的人工基质量,仍需要更多的研究作为支撑。

(3) 基质表面生物膜的成熟和强化。人工基质表面生物膜中生物群落的成熟,通常为一个自然驯化成熟的过程,该过程较为缓慢,一般需要30 d左右才能够完成。但是,对于膜中各个微生物群落的结构组成、具体功能、群落演替规律来说,目前仍然是一个“黑匣子”,其中的秘密也等待着更多学者的更多努力和研究的揭示。

因此,今后对人工基质在对虾养殖中的应用研究

中,可以借助其他技术手段,例如与现代分子生物学技术结合,培育高效的污染物降解菌;与纳米材料技术相结合,构建高亲和力的生物膜载体材料;还可以结合当代固定化微生物技术,对选育出来的菌株进行固定、包埋,使之能够更加持久、高效的发挥作用等。

参考文献:

- [1] 陈亮亮,董宏标,李卓佳,等.生物絮团技术在对虾养殖中的应用及展望[J].海洋科学,2014,38(8):103-108.
Chen Liangliang, Dong Hongbiao, Li Zhuojia, et al. Review of the application and perspective of biofloc technology in shrimp culture[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 103-108.
- [2] 郭辰,王大鹏,邓超冰,等.广西沿海池塘养殖污染调查与分析[J].海洋环境科学,2014,33(2):253-257.
Guo Chen, Wang Dapeng, Deng Chaobing, et al. Investigation and analysis of Guangxi coastal pond aquaculture pollution[J]. Marine Environmental Sciences, 2014, 33(2): 253-257.
- [3] Cao L, Naylor R, Henriksson P, et al. China's aquaculture and the world's wild fisheries[J]. Science, 2015, 133-135.
- [4] Dagá P, Feijoo G, Moreira M T, et al. Bioencapsulated probiotics increased survival, growth and improved gut flora of turbot (*Psetta maxima*) larvae[J]. Aquacult International, 2013, 21(2): 337-345.
- [5] Muñoz-Atienza E, Gómez-Sala B, Araújo C, et al. Antimicrobial activity, antibiotic susceptibility and virulence factors of Lactic Acid Bacteria of aquatic origin intended for use as probiotics in aquaculture[J]. BMC Microbiology, 2013, 13(1): 15.
- [6] 张波.人工水草在水产养殖中的作用机制研究[D].广州:中山大学,2009.
Zhang Bo. The mechanisms of artificial plants in aquaculture[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.
- [7] 吴睿,张晓松,戴江玉,等.3种人工载体净化富营养化水体能力的比较[J].湖泊科学,2014,26(5):682-690.
Wu Rui, Zhang Xiaosong, Dai Jiangyu, et al. Comparison of the abilities of three artificial substrates in purifying eutrophic waters[J]. Lake Sciences, 2014, 26(5): 682-690.
- [8] 吴敏.人工介质富集微生物及其对微量有机物降解的研究[D].南京:东南大学,2005.
Wu Min. Study on the artificial media's performance in microbe enrichment and its biodegradability on trace-quantity-organic pollutants[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [9] 朱文君.自然曝气生物滤床对微囊藻毒素的处理效果及机理研究[D].广州:暨南大学,2013.
Zhu Wenjun. Removal efficiency and mechanism of microcystins by natural-aeration biofilter[D]. Guangzhou: Jinan University, 2013.
- [10] Sandifer P A, Hopkins J S, Stokes A D. Intensive culture potential of *Penaeus vannamei*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1987, 18(2): 94-100.
- [11] Schweitzer R, Araabtes R, Baloi M F, et al. Use of artificial substrates in the culture of *Litopenaeus vannamei* (Biofloc System) at different stocking densities: Effects on microbial activity, water quality and production rates[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 54: 93-103.
- [12] Zhang J, Chen L, Dong H, et al. Artificial substrates in zero-water-exchange culture system regulate the rearing performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) under the winter indoor condition[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(1): 91-100.
- [13] Viau V E, Marciano A, Iriel A, et al. Assessment of a biofilm-based culture system within zero water exchange on water quality and on survival and growth of the freshwater shrimp *Neocaridina heteropoda heteropoda*[J]. Aquaculture Research, 2016, 47: 2528-2542.
- [14] Wahl M. Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects[J]. Marine Ecology Progress Series, 1989, 58(1): 175-189.
- [15] Azim M E, Rahaman M M, Wahab M A, et al. Periphyton-based pond polyculture system: a bio-economic comparison of on-farm and on-station trials[J]. Aquaculture, 2004, 242(1): 381-396.
- [16] 杨红艳.人工水草技术及其在城镇河道生态修复中的应用研究[D].济南:山东师范大学,2013.
Yang Hongyan. The technology of artificial plants and the application and research of ecological restoration in urban river [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013.
- [17] 蒋凯凤,肖继波.水处理生物膜载体研究进展[J].浙江林学院学报,2010,27(3):451-455.
Jiang Kaifeng, Xiao Jibo. Research progress of biofilm carrier for wastewater treatment[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(3): 451-455.
- [18] 薛松松.纳米生态基在水产养殖中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
Xue Songsong. The applied research of Nano-ecobase in aquaculture[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [19] Audelo-Naranjo J M, Martínez-Córdova L R, Gómez-Jiménez S, et al. Intensive culture of *Litopenaeus vannamei* without water exchange and with an artificial substrate[J]. Hidrobiológica, 2012, 22(1): 1-7.
- [20] 江兴龙,邓来富.凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)池塘生物膜低碳养殖技术研究[J].海洋与湖沼,2013,6:1536-1543.
Jiang Xinglong, Deng Laifu. Technique of pond aquaculture with biofilm low-carbon for white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 6: 1536-1543.
- [21] 吴伟,陈家长,胡庚东,等.利用人工基质构建固定化微生物膜对池塘养殖水体的原位修复[J].农业环

境科学学报, 2008, 4: 1501-1507.

Wu Wei, Chen Jiazhang, Hu Gengdong, et al. Research on the immobilized biofilm structure of the artificial substrates and in-site bioremediation of the pond aquaculture water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 4: 1501-1507.

- [22] Moss K R K, Moss S M. Effects of artificial substrate and stocking density on the nursery production of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2004, 35(4): 536-542.
- [23] Ootoshi C A, Tang L R, Moss D R, et al. The rising tide-proceedings of the special session on sustainable shrimp farming [M]. Baton Rouge, Louisiana, USA: World Aquaculture Society, 2009: 316.
- [24] Samocha T M, Wilkenfeld J S, Morris T C, et al. Intensive raceways without water exchange analyzed for white shrimp culture[J]. Global Aquaculture Advocate, 2010, 13: 22-14.
- [25] Abreu P C, Ballester E L C, Odebrecht C, et al. Importance of biofilm as food source for shrimp *Farfantepenaeus paulensis* evaluated by stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 347(1): 88-96.
- [26] Kuwae T, Beninger P G, Decottignies P, et al. Biofilm grazing in a higher vertebrate: the western sandpiper, *Calidris mauri*[J]. Ecology, 2008, 89(3): 599-606.
- [27] Thompson F L, Abreu P C, Wasielesky W. Importance of biofilm for water quality and nourishment in intensive shrimp culture[J]. Aquaculture, 2002, 203(3): 263-278.
- [28] Epp M A, Ziemann D A, Schell D M. Carbon and nitrogen dynamics in zero-water exchange shrimp culture as indicated by stable isotope tracers[J]. Aquaculture Research, 2002, 33(11): 839-846.
- [29] 宋协法, 马真, 万荣. 纳米生态基在凡纳滨对虾养殖中的应用研究[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2010, 40(10): 24-28.
Song Xiefa, Ma Zhen, Wan Rong. Application of a Nano material ecobase in *Litopenaeus vannamei* culture systems[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2010, 40(10): 24-28.
- [30] Austin B, Austin D D A. Bacterial fish pathogens: diseases of farmed and wild fish [M]. Chichester, UK: Springer, 2007.
- [31] Brock J A, Main K L. A guide to the common problems and diseases of cultured *Penaeus vannamei*[M]. Baton Rouge, Louisiana, USA: World Aquaculture Society, 1994: 242.
- [32] Alabi A O, Cob Z C, Jones D A, et al. Influence of algal exudates and bacteria on growth and survival of white shrimp larvae fed entirely on microencapsulated diets[J]. Aquaculture International, 1999, 7(3): 137-158.
- [33] Austin B, Day J D. Inhibition of prawn pathogenic *Vibrio* spp. by a commercial spray-dried preparation of *Tetraselmis suecica*[J]. Aquaculture, 1990, 90: 389-392.

Review of application of artificial substrates in shrimp culture

ZHANG Jia-song¹, CHEN Liang-liang^{1, 2}, FENG Zhen-hua¹, DUAN Ya-fei¹,
DONG Hong-biao¹, LI Hua¹, LIU Qing-song¹

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Received: Jan. 22, 2015

Key words: Shrimp; artificial substrate; biofilm; mechanism

Abstract: This article briefly reviews the current penaeid shrimp farming model, which caused a series of problems, such as environmental pollution, drug abuse, and food insecurity. This article also introduces the periphyton-based biofilm technology, which is a newly developing shrimp wastewater treatment technology, along with a detailed discussion on biofilm structure and its formation process. The functional mechanisms (water quality control, feed supplement, biosecurity, and disease defense) of artificial substrates are also discussed. Finally, several related discussions are provided according to the problems such as artificial selection, addition proportion, artificial regulation of biofilm communities, and the surface-immobilized microorganism technology in practical application.

(本文编辑: 谭雪静)