

基于微藻的水产养殖废水处理技术研究进展

孟范平, 官艳艳*, 马冬冬

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘要: 利用微藻处理水产养殖废水是一项污水资源化生物技术。近年来, 国内外开展了大量有关藻类培养和废水处理的研究, 发展了藻类处理技术, 包括藻类塘、活性藻、固定化藻类、光生物反应器。本文综述了微藻净化水产养殖废水的原理、研究成果及应用实例, 并对今后的研究方向提出了建议。

关键词: 微藻; 水产养殖; 废水; 处理

中图分类号: Q938 **文献标识码:** A **文章编号:** 0001-6209 (2009) 06-0691-06

随着人口的增长, 人类对蛋白质的需求量日益增加, 而鱼类等海产品则是蛋白质的重要来源。据预测, 到 2050 年, 人类对水产品的需求量将会增加至 50 亿吨^[1]。为了满足人们对水产品的不断需求, 水产养殖得到了迅猛发展。但在养殖过程中, 饵料的排放、残饵的分解、排泄物的产生以及化学药品和抗生素的使用等, 使水体中营养物质、有机碎屑等严重超标, 导致养殖水域环境恶化, 生态系统失衡, 病害滋生^[2-4]。水体污染不仅影响生态环境质量, 而且危害养殖业本身。因此, 水产养殖废水的处理和循环利用逐渐受到关注。

微藻是一类光能自养型单细胞生物, 具有资源丰富、种类繁多、光合效率高、生长速度快、适应性强的特点。利用微藻处理水产养殖废水, 一方面可以净化污水, 另一方面可以获得有价值的藻类, 促进养殖业的可持续发展^[5]。参考国内外有关研究资料与文献, 本文就近 20 年来利用微藻处理水产养殖废水的研究进展进行了评述, 并提出了今后的研究方向。

1 利用藻类塘处理水产养殖废水

20 世纪 60 年代建立在水体藻菌共生自净原理

基础上的氧化塘技术, 经过广泛应用和发展, 已成为高效藻类塘 (High Rate Algal Pond, HRAP)^[6]。HRAP 是美国加州大学伯克利分校 Oswald 等人提出的^[7], 其对污染物的降解主要是通过藻类和细菌形成的复杂共生系统而实现的 (见图 1)。好氧菌将含碳有机物降解为二氧化碳和水; 将含氮有机物进行氨化、硝化, 分别生成氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐; 将含磷有机物最后降解为正磷酸盐。而藻类则利用这些物质作为原料, 以阳光为能源, 通过光合作用制造有机物, 并释放氧气, 供细菌氧化有机物用, 如此循环, 从而达到处理废水的目的。

与传统稳定塘不同的是, 高效藻类塘具有以下 4 个方面的特征: (1) 塘的深度较浅, 通常稳定塘的深度在 0.5 m ~ 2.0 m 之间, 而 HRAP 的深度则控制在 0.3 m ~ 0.6 m; (2) 需垂直于塘内廊道的连续搅拌装置, 促进污水与藻类的混合, 避免污泥在塘内的淤积, 并可调节塘内氧和二氧化碳的浓度, 均衡池内水温以及促进氨氮的吹脱; (3) 停留时间短, HRAP 的平均停留时间一般为 4 ~ 10 d, 较一般稳定塘的停留时间缩短 7 ~ 10 倍; (4) 一般把塘分成几个狭长的廊道, 所以塘的宽度一般较窄。

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目 (BS03124)

* 通信作者。Tel: +86-532-66781823; Fax: +86-532-66782875; E-mail: gongyanyan331@yahoo.com.cn

作者简介: 孟范平 (1965 -), 男, 山东省招远市人, 博士, 教授, 研究方向为水污染控制技术。E-mail: fanpingm@tom.com

收稿日期: 2008-12-12; 修回日期: 2009-01-10

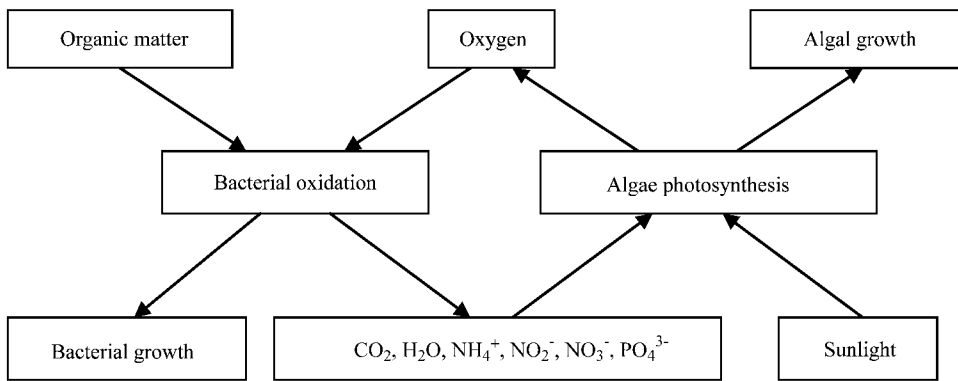


图 1 菌藻共生关系示意图

Fig. 1 The schematic diagram of algae-bacteria symbiotic relationship^[8].

高效藻类塘因其对氮、磷的去除效率高,能承受较高的负荷,占地面积少,维护简单,加之在土建和运行成本上并无明显增加,受到专家学者越来越多的关注^[9]。Hammouda 等^[10]利用四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 和普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 处理水产养殖废水,处理后的废水 COD、BOD₅ 可达到排放标准,氮、磷去除率均达到 100%。

高效藻类塘对病原菌也有较好的去除率,藻类有 2 种促进消毒的方式:一是藻类在进行光合作用的同时不仅传递氧也传递了热能,在较高的温度下,病原体的寿命极大缩短;二是由于藻类在光合作用的过程中消耗了大量的二氧化碳,而导致水中 pH 值升高,也缩短了病原菌的寿命^[11]。Green 等^[12]的研究发现,当 pH 值为 9.2 时,维持 24 h,高效藻类塘能 100% 地去除水产养殖废水中的大多数病原菌。

虽然利用高效藻类塘处理废水成本低廉,但是由于该技术主要依靠自然生长的藻类和半人工控制手段,受环境因素特别是光照、气温等条件的影响明显,当夏季某些月份气温过高或冬季温度较低时,由于藻类的生长受到抑制而影响处理效果;藻类生长所需的 pH 和 O₂ 不易控制;处理后出水中的藻类难以收获或收获费用太高;另外,沉积物在池内聚积,处理效率会随之逐年降低,塘的寿命相应减少,这些都严重阻碍了高效藻类塘的广泛应用。

2 利用活性藻处理水产养殖废水

活性藻污水处理技术始于 20 世纪 70 年代初期,也是依据藻菌共生代谢原理从污水中去除有机污染物和氮、磷营养盐,即:先人工培养出藻-菌混合絮凝物,即活性菌团,然后利用部分或全部污水进行藻菌继续培养。藻-菌絮凝团中的主要生物有好气性细菌、刚毛藻、丝藻、小球藻、栅藻、绿球藻、颤藻和硅藻等。利用活性藻技术处理污水,不需要任何化

学物品,在特定受控条件下,菌藻共存,微藻对许多营养盐发生作用,从而达到去除的目的,这是任何物理、化学方法所不能及的。王高等^[13]采用正交法确定了由斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*)、绿藻 (*Chlorella vulgaris*)、亚硝化细菌 (Nitrite bacteria)、硝化细菌 (Nitrate bacteria) 组成的复合藻-菌净化系统去除水产养殖水体中氨态氮和亚硝酸态氮的最优化数量配比关系,即栅藻:小球藻:亚硝化细菌:硝化细菌 = 2.13:1:2.38:3.73,利用该系统处理宝鸡市柔谷渔场养殖池塘老化水体,氨态氮和亚硝酸态氮的去除率分别为 97.3% 和 68.8%,远高于单菌、单藻的作用效果。

活性藻系统去除效果的好坏取决于微藻的光能合成和细菌的氧化代谢作用,并受控于氮、磷初始浓度、氮磷组合、水温、光强、光暗循环、进水负荷、停留时间、微藻种类以及生物浓度等一系列基本参数。

Aslan 等^[14]在 pH7.0, 室温 (20 ± 2°C), 光照为 4100 lux, 氮、磷浓度比 2:1 的条件下,研究了普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 对合成废水中氮磷的去除效果,结果表明,当 NH₄⁺-N 的初始浓度 < 22 mg/L, PO₄³⁻-P 的初始浓度 < 7.7 mg/L 时,普通小球藻对氨氮废水具有较好的去除效果,去除率分别为 100% 和 78%。随着 NH₄⁺-N 初始浓度的升高,去除率逐渐降低,当 NH₄⁺-N 浓度增至 129 mg/L,去除率仅为 24%;当 PO₄³⁻-P 的初始浓度由 7.7 mg/L 增加至 199 mg/L,去除率降至 30%;且普通小球藻对 NH₄⁺-N 的去除率明显高于 PO₄³⁻-P。胡开辉等^[15]在小球藻液中分别添加不同浓度比的氮、磷溶液,研究普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 净化氮、磷的能力。结果表明,低浓度比的氮、磷溶液有利于小球藻对氮、磷的吸收。吕福荣等^[16]研究发现,升高温度或加强光照有利于小球藻 (*Chlorella* sp.) 对模拟氨氮废水中磷、氮的吸收。Domenico 等^[17]利用斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 在光暗循环为 14:10 的条件下处理模拟氨

氮废水,发现氮的去除过程主要发生在有光的时段。张继平等^[18]研究发现,小球藻(*Chlorella* sp.)能显著降低南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)养殖水体中亚硝酸盐氮含量,当试验水体中的 NO_2^- -N起始质量浓度为0.5 mg/L,小球藻的接种密度为 2.0×10^4 细胞数/mL时, NO_2^- -N的降解率可达到71.6%。况琪军等^[19]利用活性藻系统去除人工合成污水中的氮、磷及有机物,在 $26 \pm 2^\circ\text{C}$,光强约4000 lux,进水负荷25~28 L/d和停留时间24 h的条件下,活性藻系统对TN、TP、 COD_{Cr} 和 BOD_5 的平均去除率分别达77.62%、33.23%、90.89%和95.77%;当进水负荷加大1倍,停留时间相应缩短,光强减弱,温度降低时,TP和 BOD_5 的处理效果受到明显影响, COD_{Cr} 和TN的去除率基本上不随系统条件的改变而降低;及时添加新鲜藻种有助于处理效果的提高。陈海敏等^[20]使用光合细菌(Photosynthetic Bacteria)和蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)联合处理工厂化甲鱼养殖废水,研究结果表明,光合细菌和小球藻能很好地去除水体中的氮、磷,尤其对氨氮的去除率高达90%以上,且处理后水体中的溶氧量提高到10 mg/L以上,有利于养殖废水的重新利用,在工厂化养殖废水处理中有着良好的应用前景。

另外,养殖过程中使用的硫酸铜杀菌剂往往未经任何处理就直接排入外界水体,造成海洋环境的铜污染。李坤等^[21]的研究发现,绿藻(*Chlorella vulgaris*)对不同浓度的 Cu^{2+} 均有清除能力,当 Cu^{2+} 的浓度为0.094~0.484 mol/L时,去除率为61%~84.5%。

3 利用固定化藻类处理水产养殖废水

微藻的固定化是20世纪80年代借鉴细菌固定化技术而发展起来的一项重要生物技术^[22]。该技术利用物理和化学手段将游离细胞定位于限定的空间区域,使其保持生物活性并可反复利用。藻类固定化的基本方法主要包括吸附法和包埋法。吸附是将藻细胞附着在载体表面,而包埋则是将藻细胞包埋或封闭在载体内部。两者都具有操作简便,对藻细胞活性影响较小等特点,但是吸附法固定的藻细胞数量有限,而且细胞容易脱落。所以,包埋法是目前应用最广泛的藻类固定化方法^[23]。与游离藻类相比,固定化使得微藻具有细胞密度高、反应速度快、负荷能力强、运行稳定可靠、藻细胞流失少、易于固液分离等特点,还能提高藻类的合成代谢活性,延迟衰老,并在一定程度上降低藻类的分解代谢活性,而包埋载体本身也具有一定吸收氮、磷的能力,因此,固定化藻类对氮、磷的净化效率明显高于悬浮

态藻^[24]。Tam等^[25]研究了普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)在悬浮态和固定态下,对模拟生活污水的净化效果,结果表明固定态小球藻对氮、磷的去除率分别为78%和94%,而悬浮态小球藻的去除率仅为40%和59%,因此,固定化小球藻的净化效率比悬浮态要高得多。

近年来,国内外学者对固定化微藻处理水产养殖废水及人工合成废水进行了大量研究,获得了许多有价值的资料(表1)。由表1可以看出,固定化微藻可以有效去除废水中的氮、磷,去除率均在65%以上。

当然,固定化微藻处理系统也不是完美无缺的,其主要的缺陷是:固定化藻球的制备程序复杂,需要离心、冲洗等较多步骤;固定化载体还能限制光能的获得和物质的传递;微藻对氮、磷的吸收会受到固定化载体、底物浓度、藻细胞密度、pH值及温度等因素的影响^[35];使用一定时间后,藻细胞的生长造成固定化藻球破裂;藻细胞的收获也较繁琐。这些不利因素在一定程度上影响了固定化微藻的应用。

4 利用光生物反应器处理水产养殖废水

20世纪80年代,光生物反应器成为微藻生物技术的重要研究热点^[36]。光生物反应器是指用于培养光合微小生物及具有光合能力的植物组织、细胞的设施或装置,通常具有光照、温度、pH值、营养盐、气体交换等培养条件的调节控制系统,能进行半连续或连续培养并具有较高的光能利用率,能够获得较高的生物密度^[37]。

微藻光生物反应器可以分为开放式和封闭式两大类。开放式光生物反应器以开放式跑道水池为主,构建简单,成本低廉,操作简便。但开放式培养过程受光照、温度等自然环境影响较大,易被真菌、原生动物和其他藻种污染,并且水分蒸发严重,二氧化碳供给不足,这些因素都将导致藻细胞培养密度偏低、采收成本较高^[38]。目前,螺旋藻、小球藻及盐藻等少数几种能耐受极端环境的微藻能够采用开放式培养。对于要求温和培养条件和种群竞争能力较弱的微藻,则只能采用封闭式光生物反应器培养。

与开放式培养系统相比较,封闭式光生物反应器有以下优点:(1)能够培养更多种类的微藻;(2)产率较高,全年生产期较长;(3)能够维持较高的藻液浓度,能一定程度地降低采收成本;(4)能够更好地控制培养条件,如温度、pH等;(5)能有效地降低污染。封闭式光生物反应器主要有垂直柱式、管式、板式^[39]以及一些其它特殊类型,例如:光导纤维光生

表 1 固定化微藻去除水产养殖废水及人工合成废水中的氮、磷的研究现状

Table 1 The research status of nitrogen and phosphorus removal from aquaculture and synthetic wastewater by immobilized microalgae

Immobilized carrier	Species of experimental microalgae	Removal materials	Removal rates/%	References
Sodium alginate	<i>Chlorella vulgaris</i>	NH_4^+ -N	100	[26]
		PO_4^{3-} -P	71	
Sodium alginate	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	NH_4^+ -N	87	[27]
Sodium alginate	<i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Azospirillum brasilense</i>	NH_4^+ -N	99	[28]
		PO_4^{3-} -P	75	
Sodium alginate	<i>Scenedesmus</i> sp.	NH_4^+ -N	90	[29]
		PO_4^{3-} -P	70	
Sodium alginate	<i>Oocystis borgei</i>	NO_2^- -N	66	[30]
Sodium alginate	<i>Scenedesmus obliquus</i>	NH_4^+ -N	79	[31]
		PO_4^{3-} -P	83	
Calcium alginate	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	NH_4^+ -N	90	[32]
		PO_4^{3-} -P	83	
Chitosan	<i>Scenedesmus obliquus</i>	NH_4^+ -N	70	[33]
		PO_4^{3-} -P	94	
PVA-sulfate	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> and activated sludge	NO_3^- -N	100	[34]
		PO_4^{3-} -P	99	

物反应器^[40]。柱式光生物反应器多用于初期的小试研究,是实验室范围内的首选装置。根据搅拌方式不同,柱式反应器又可分为机械搅拌式、鼓泡式和气升式等^[41]。微藻光生物反应器多使用气升式^[42-43],能提供均质的反应系统,非常适合于实验室研究。该系统以气体为动力,靠导流装置的引导,形成气液混合物的总体有序循环(图 2)。反应器内设导流管,向导流管通入气体,使管内的液体比重变小,因而形成上升流,并在导流管顶部开口处溢出,进入反应器主体与导流管壁之间的空腔;导流管底部则形成负压,将反应器主体与导流管之间的空腔内的液体吸入,补充上升流带走的液体从而形成循环。气升式反应器以气体传动,避免了机械搅拌部件对藻体的损伤;在导流筒和外部空腔之间形成有序的循环,使微藻得到均匀的光照;通气的同时带入 CO_2 ,提供藻类生长所需碳源,脱去培养液中过积分积累的氧,可谓一举多得。

目前,藻类光生物反应器多用于单纯获得藻体生物量或其代谢产物,与废水处理相结合的微藻光生物反应器培养研究很少。马冬冬等将亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)引入光-膜反应器,构建了一台光-膜组合式生物反应器,用于去除南美白对虾养殖废水中的氮磷营养盐。结果表明,废水中无机氮和无机磷的去除率均在 80% 以上,达到《海水水质标准》二类以上水质要求。该技术可以用来对海水养殖业废水进行深度处理以达到循环利用的目的。

密闭式光生物反应器培养后期由于细胞浓度的升高,限制光的穿透,降低了光照效率;在培养过程中由于水压增加,使细胞受到损伤;反应器和生物传

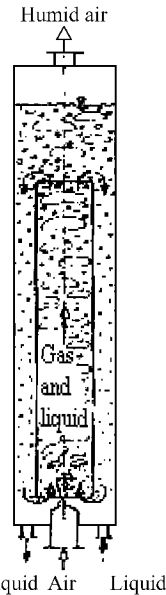


图 2 气升式光生物反应器结构示意图

Fig. 2 The structure map of airlift photobioreactor.

感器上易发生附着,且这种技术投资和操作成本较高,不能提供类似填充床中高的细胞负载,因此制约了微藻在废水处理中的发展。

5 未来的研究方向

虽然微藻在处理水产养殖废水中显示了其优越性并取得了很大进展,但是仍然存在一些问题有待解决。具体表现为以下 4 个方面:

(1) 新型藻类资源和产品的应用与开发:选育和改良新型藻种,继续筛选具有高效净化能力、营养价值高的微藻,重点是筛选对有机物具有降解能力和自身经济价值较高的藻种。

定化首先需要选择理想的固定化载体。目前,包埋法固定化载体主要有天然高分子凝胶,如海藻酸钙、琼脂等和有机合成高分子凝胶载体,如聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(ACAM)等。天然高分子对生物没有毒害,传质性能较好,但是强度较低;有机合成高分子凝胶强度较大,但其传质性能稍差,在包埋时有时可能会影响细胞活性。因此,开发复合型固定化载体,改善其性能,是藻类固定化技术研究的重要内容。今后还需弄清固定化微藻的生理生化特性及其净化机制,研究固定化微藻的保存、活化方法,为批量生产奠定基础。

(3)光生物反应器的构建与规模化:将微藻光生物反应器与水产养殖废水处理相结合,开发适合于规模化运转的高效生物反应器,实现污染控制与资源化利用相结合。

(4)从废水处理系统中收获藻类方法的探索:微藻体积小、质量轻,营浮游生活,沉降性能很差,传统的静置沉淀方法很难达到良好的固液分离效果。因此,还需寻求一种经济有效的方法,将微藻和废水分开,使微藻资源回收利用,出水水质达到要求。

可以预计,上述问题的逐步解决将为微藻应用于水产养殖废水净化提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 毛玉泽,杨红生,王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用. 中国水产科学(*Journal of Fishery Sciences of China*), 2005, 12(2): 225 - 231.
- [2] 姜红,李月红,黄权. 养殖水体的有机物负荷及其减轻对策. 中国水产(*China Fisheries*), 2000, (2): 32 - 33.
- [3] Lai HT, Hou JH, Su CI, et al. Effects of chloramphenicol, florfenicol, and thiamphenicol on growth of algae *Chlorella pyrenoidosa*, *Isochrysis galbana*, and *Tetraselmis chui*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(2): 329 - 334.
- [4] Soriano EM, Nunes SO, Carneiro MA, et al. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae*. *Biomass and Bioenergy*, 2008, In Press.
- [5] Carlose R, Rubene AH. Microalgae and bacteria interaction in the aquatic environment and their potential use in aquaculture. *Revista Chilena De Historia Natural*, 2003, 76(4): 725 - 736.
- [6] Azov Y. Operation of high-rate oxidation ponds: theory and experiments. *Water Research*, 1982, 16(7): 1153 - 1161.
- [7] Gomez E, Casellas C, Picot B, et al. Elimination processes in stabilization and high-rate algae pond systems. *Water Science Technology*, 1995, 31(12): 303 - 312.
- [8] 李小霞,解庆林. 菌藻共生系统处理污水的研究及应用前景. 广西民族学院学报(自然科学版)(*Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition)*), 2006, 12(3): 112 - 117.
- [9] 何少林,黄翔峰,乔丽,等. 高效藻类塘氮磷去除机理的研究进展. 环境污染治理技术与设备(*Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*), 2006, 7(8): 6 - 11.
- [10] Hammouda O, Gaber A. Microalgae and wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1995, 31(3): 205 - 210.
- [11] 陈鹏,周琪. 高效藻类氧化塘处理有机废水的研究和应用. 上海环境科学(*Shanghai Environmental Science*), 2001, 20(7): 309 - 311.
- [12] Green FB, Bernstone LS, Lundquist TJ, et al. Advanced integrated wastewater pond systems for nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 1996, 33(7): 207 - 217.
- [13] 王高学,姚嘉赟,王绥标. 复合藻-菌系统水质净化模型建立与净化养殖水体水质的研究. 西北农业学报(*Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*), 2006, 15(2): 22 - 27.
- [14] Aslan S, Kapdan IK. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 64 - 70.
- [15] 胡开辉,朱行,汪世华,等. 小球藻对水体氮磷的去除效率. 福建农林大学学报(*Journal of Fujian Agricultural and Forestry University*), 2006, 35(6): 648 - 651.
- [16] 吕福荣,杨海波,李英敏. 小球藻净化污水中氮磷能力的研究. 生物学杂志(*Journal of Biology*), 2003, 20(2): 25 - 34.
- [17] Domenico V, Herlinda GV, Gabriel C. Nitrogen removal and recycling by *Scenedesmus obliquus* in semicontinuous cultures using artificial wastewater and a simulated light and temperature cycle. *Bioresource Technology*, 2005, 96(3): 359 - 362.
- [18] 张继平,郭照良. 小球藻对降低南美白对虾养殖水体中亚硝酸盐氮含量的研究. 水产科学(*Fisheries Science*), 2006, 25(10): 517 - 519.
- [19] 况琪军,谭渝云. 活性藻系统对氮、磷及有机物的去除研究. 中国环境科学(*China Environmental Science*), 2001, 21(3): 212 - 216.
- [20] 陈海敏,陈声明. 工厂化水产养殖废水菌藻联合处理模式研究. 浙江树人大学学报(*Journal of Zhejiang Shuren University*), 2002, 2(4): 64 - 67.
- [21] 李坤,李琳,王福强,等. 淡水小球藻清除 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 污染能力的研究. 中国微生态学杂志(*Chinese Journal of Microecology*), 2006, 18(3): 194 - 198.
- [22] 仵小南,谭桂英,周百成,等. 几种海洋微藻的固定化培养. 海洋学报(*Acta Oceanologica Sinica*), 1992, 14(1): 9 - 13.
- [23] 尹长松,孙育平. 藻类固定化技术在水产养殖废水处理中的应用前景. 内陆水产(*Inland Fisheries*), 2002, 27(7): 40 - 41.
- [24] Jiménez-Pérez MV, Sánchez-Castillo P, Romera O, et al. Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, 34(5): 392 - 398.

- [25] Tam NFY, Wong YS. Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal. *Environmental Pollution*, 2000, 107(1): 145 – 151.
- [26] Travieso L, Benitez F, Weiland P, et al. Experiments on immobilization of microalgae for nutrient removal in wastewater treatments. *Bioresource Technology*, 1996, 55(3): 181 – 186.
- [27] Chen YC. Immobilized microalga *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta, Chlorococcales) for long-term storage and for application for water quality control in fish culture. *Aquaculture*, 2001, 195(1 ~ 2): 71 – 80.
- [28] Luz EB, Manuel M, Hernandez JP, et al. Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research*, 2002, 36(12): 2941 – 2948.
- [29] 张恩栋, 王冰, 王起华, 等. 固定化的栅藻深度处理脱氮和除磷能力. 植物生理学通讯 (*Plant Physiology Communications*), 2006, 42(6): 1037 – 1040.
- [30] 黄翔鹤, 李长玲, 郑莲, 等. 固定化微藻对改善养殖水质和增强对虾抗病力的研究. 海洋通报 (*Marine Science Bulletin*), 2005, 24(2): 57 – 62.
- [31] 严国安, 李益健, 王志坚, 等. 固定化栅藻对污水的净化及其生理特征的变化. 中国环境科学 (*China Environmental Science*), 1995, 15(1): 10 – 13.
- [32] 张向阳, 邢丽贞, 张彦浩, 等. 固定化小球藻去除污水中氮、磷的试验研究. 中国给水排水 (*China Water & Wastewater*), 2008, 24(1): 95 – 101.
- [33] Fierro S, Sánchez M, Copalcuta C. Nitrate and phosphate removal by chitosan immobilized *Scenedesmus*. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5): 1274 – 1279.
- [34] Wang Y, Huang GL. Effect of illumination of nitrate and phosphate removal by co-immobilized *Chlorella pyrenoidosa* and activated sludge. *Artificial Cells, Blood Substitutes and Biotechnology*, 2005, 33(3): 357 – 369.
- [35] 马志珍. 微藻固定化培养技术及其应用前景. 国外水产 (*Foreign Fisheries*), 1993, 3: 1 – 4.
- [36] 刘晶, 张嗣良. 封闭式光生物反应器研究进展. 生物工程学报 (*Chinese Journal of Biotechnology*), 2000, 16(2): 119 – 124.
- [37] 张健, 王起华, 费修纛. 藻类光生物反应器研究进展. 水产科学 (*Fisheries Science*), 1999, 18(2): 35 – 39.
- [38] 伊廷强, 叶静, 何泽超. 海洋微藻培养及光生物反应器的研究进展. 化工设计 (*Chemical Engineering Design*), 2008, 18(3): 11 – 14.
- [39] 王长海, 董言梓. 光生物反应器及其研究进展. 海洋通报 (*Marine Science Bulletin*), 1998, 17(6): 79 – 86.
- [40] Burges JG. An optical fiber photobioreactor for enhanced production of the marine unicellular algae *isochrysis galbana* TIs (UTEX LB2307) rich in docosahexaenic acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1993, 39(4 – 5): 56 – 459.
- [41] 张元兴, 许学书. 生物反应器工程. 上海: 华东理工大学出版社, 2001.
- [42] 吴垠. 气升式光生物反应器培养海洋微藻的中试研究. 农业工程学报 (*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*), 2004, 20(5): 237 – 240.
- [43] 张栩. 气升式藻类生物反应器的应用研究. 海洋科学 (*Marine Sciences*), 2000, 4(5): 14 – 17.

Recent progress in treatment of aquaculture wastewater based on microalgae-A review

Fanping Meng, Yanyan Gong*, Dongdong Ma

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Microalgae enables aquaculture wastewater recycling through a biological conversion. Recently, many studies have been reported on microalgae cultivation and wastewater treatment, including developing various wastewater treatment technologies such as algae pond, activated algae, immobilized algae and algae photo-bioreactor. In this review, we address the mechanisms, progress and application in the purification of aquaculture wastewater, as well as some research perspectives.

Keywords: microalgae; aquaculture; wastewater; treatment

(本文责编: 张晓丽, 谷志静)

Supported by the Shandong Provincial Scientific Research Foundation for Excellent Young Scientists (BS03124)

* Corresponding author. Tel: +86-532-66781823; Fax: +86-532-66782875; E-mail: gongyanyan331@yahoo.com.cn

Received: 12 December 2008/Revised: 10 January 2009