

固定化藻菌对去除珍珠蚌养殖废水氮磷的效果分析

邹万生¹, 刘良国¹, 张景来², 尹富士³, 王文彬¹, 杨品红¹

(1. 湖南文理学院生命科学学院, 湖南 常德 415000; 2. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 3. 中国农业科学院植保研究所, 北京 100081)

摘要:研究了固定化 EM 藻菌(CEMI)、固定化活性污泥藻菌(CAMI)、固定化 EM-活性污泥协联藻菌(CEAMI)对珍珠蚌养殖废水中氮磷的去除效果以及光照强度、温度对三者脱氮去磷的影响。以无包埋藻菌胶球(NM)作为对照组进行 96 h 持续去 N、P 实验, 结果表明:在设计条件下 CEAMI、CAMI 和 CEMI 的去 N 峰值(最高值)分别为 91.16%、88.07%、80.45%, 去 P 峰值(最高值)分别为 84.67%、76.28%、77.81%, CAMI 去 N 峰值出现在持续处理 56 h 处, CAMI 去 P 峰值和 CEAMI、CEMI 的去 N、P 峰值均出现在 64 h 处;CEMI 前 40 h 处于低 N、P 去除率的适应期, 此期间 CEMI 与 CEAMI、CAMI 的去 N 效果具有显著性差异。研究还表明, 光照强度与温度是该三者去 N、P 的重要环境因子, CEAMI 的去 N 峰值所需光强为 4 000 lx, 其去 P 和 CAMI、CEMI 的去 N、P 峰值均为 5 000 lx; 三者的最适去 N 温度为 25 ℃, 最适去 P 温度为 30 ℃。

关键词:固定化 EM 藻菌; 固定化活性污泥藻菌; 固定化 EM-活性污泥协联藻菌; 去氮磷率

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)04-0720-06

Analysis About Effect of Algae-bacteria Immobilized Treat Nitrogen and Phosphorus of Pearl Mussel Aquaculture Wastewater

ZOU Wan-sheng^{1,2}, LIU Liang-guo¹, ZHANG Jing-lai², YIN Fu-shi³, WANG Wen-bin¹, YANG Pin-hong¹

(1. Life Sciences of Arts and Sciences of Hunan University, Changde 415000, China; 2. School of Environmental Sciences Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3. Agricultural Sciences Academy of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Effects of EM bacteria-algae immobilized (CEMI), Activated sludge bacteria-algae immobilized (CAMI) and EM-Activated sludge-bacteria federation algae immobilized (CEAMI) on the removal of nitrogen and phosphorus in pearl mussel aquaculture wastewater were studied, as well as light intensity and temperature affected on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus. Experiment with non-embedded algae bacteria ball (NM) as the control group were conducted 96 hour successively. Results showed that CEAMI, CAMI and CEMI's removal N peak (maximum value) were 91.16%, 88.07%, 80.45% in the design condition, and removal P peak (maximum value) were 84.67%, 76.28%, 77.81%. Removal N of CAMI reach peak after continuous treatment 56 hours, but CAMI removal P peak, CEAMI and CEMI's removal N, P peak were found after continuous treatment 64 hours; CEMI was in a low N, P removal rate in prior 40 hours, which was the idiographic adaptation period. During this period CEMI, CEAMI and CAMI's removal N effects were significant differences. The study also indicated that light intensity and temperature were the important environmental factors which affect the N, P removal rate. CEAMI's N removal rate went peak at 4 000 lx of intensity, removal P peak and CAMI, CEMI's removal N, P peak were at 5 000 lx; The optimum removal N temperature of them was 25 ℃, the optimum removal P temperature was 30 ℃. The contribution rate of NM ball removal N, P were approximately 1.16%, 0.47%.

Keywords: immobilization of *Chlorella pyrenoidosa* and effective microorganisms; immobilization of *Chlorella pyrenoidosa* and activated sludge; immobilization of *Chlorella pyrenoidosa* and EM-activated sludge; rate of remove N and P

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NO.30972260); 国家公益性行业(农业)科研专项项目(NO.200903028-08); 湖南省动物学重点实验室资助项目(NO.07-A-2)

作者简介: 邹万生(1975—), 男, 湖南新化人, 硕士, 研究方向为水环境生物与水污染控制技术研究。E-mail: zwsksy@163.com

藻菌固定化 (Algae-bacteria Immobilization, ABI) 技术是一门 20 世纪末发展起来的新兴技术, 由于其具有较高微生物浓度、易于固液分离、不易受毒物影响、剩余污泥量少等优点而在污水处理领域得到比较广泛应用^[1-7]。Tam, Wong 等^[1]、Travieso^[2]利用固定化藻菌对污水进行脱氮去磷, 效果好于非固定化藻菌, 且固定化藻菌脱氮去磷的有效期更长; 韩士群^[9]利用固定化微生物对养殖水体的 3 种形态氮进行处理, 处理结果表明固定化微生物可以显著降低水体的总氮、氨态氮和硝态氮的浓度, 但除了氨态氮去除率在 80% 以上, 总氮和硝态氮的去除率都处于 60%~70% 区间。自 20 世纪 90 年代以来, EM 菌开始应用于养殖、水产、环保等领域, 为养殖水体的净化提供了新途径^[8-12]。马占青等^[9-10]、王平等^[11]、邵青等^[12]利用有效微生物菌群 EM (Effective Microorganisms) 来降低养殖水体 N、P 质量浓度, 优化水质, 效果均较理想, 但单独使用 EM 净化水质, 其 TN、TP 去除率均低于 65%。在固定化藻菌体系中, 由于不同的藻、菌群组成对污水的处理效果可能存在很大差异, 且目前的文献资料中还没有见到将小球藻与 EM 菌联合固定化来净化养殖废水, 即使将 EM 菌和活性污泥进行混合固定化处理的文献也鲜见报道。

本文通过试验设计, 将小球藻与 EM 菌、小球藻与活性污泥、小球藻与 EM 和活性污泥混合菌进行固定化处理, 利用 3 种不同固定化藻菌来处理珍珠蚌养殖废水, 考察和讨论其对养殖废水中 N、P 的去除效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料选用及培养

活性污泥由常德市污水处理中心提供, 菌类以脱氮小球菌、反硝化假单胞菌、脱氮硫杆菌和聚磷菌为主优势菌。在 10 L 所要处理的养殖废水中加入适量种泥进行曝气, 直至污泥转棕黄色时静置 30 min, 弃去少量上清液后制备成新鲜活性污泥的浓缩液待用; 有效微生物菌群 EM 由湖南普利农业科技有限公司提供, EM 中代表性的微生物主要有光合细菌、乳酸菌、酵母菌、放线菌、芽胞杆菌 5 大类, 其菌液质量分数为 3:2:2:2:1。将 EM 菌种在 25 ℃ 条件下进行复壮、扩大培养, 即 EM 菌: 蜂蜜: 水为 5:5:90 (体积分数), 添加适量微量元素后在 20 L 容器内密闭 5~7 d, 以 EM 培养液 pH<3.5, 液色为棕黄色为培养截止期, EM 菌液待用; 实验藻选用蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*), 藻种由中国科学院武汉水生生物研

究所藻种库提供, 培养基选用 Kuhl 培养基^[13]。在无菌操作条件下将藻种接种到含培养基的 450 mL 锥形瓶中, 瓶口用海绵塞塞盖, 放置在温度 25 ℃、光照强度 6 000 lx、光暗比 12:12 的生化培养箱中进行保种培养, 然后在同条件下进行扩大培养待用。

1.2 养殖废水水样的选取及处理

水产养殖废水取自湖南常德东江乡珍珠蚌养殖基地池塘, 检测时先用 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤预处理, 每个指标重复测 3 次, 以平均值加减标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 废水水质见表 1。COD 测定采用重铬酸钾法; 浊度测定采用分光光度法; 总氮测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法 (GB 11894—1989); 磷以正磷酸根计量, 测定采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893—1989)。

表 1 水产养殖废水水质指标

Table 1 The water ingredient of aquaculture wastewater

COD _C /mg·L ⁻¹	浊度/NTU	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
438.81±14.30	16.64±2.37	29.13±3.85	3.57±0.66

需另添加的其他化学试剂参照 Kuhl 培养基配方配制, 其中氮源、磷源由养殖塘废水中已有的氮和磷酸盐替代, 不再添加任何碳、氮、磷源。

1.3 方法

1.3.1 藻菌固定方法

采用藻菌混合包埋固定化方法^[14-15] (Mix-immobilization, MI)。根据预试验结论, 小球藻、活性污泥及 EM 菌的混合比例均按等体积分数 (比例) 混合。

(1) 固定化活性污泥藻菌 (即小球藻与活性污泥混合固定 *Chlorella pyrenoidosa* and Activated sludge, CAMI): 分别取一定体积的藻类细胞浓缩液与新鲜活性污泥的浓缩液进行等体积比例混合, 再与预先灭菌的凝胶剂 (2% 海藻酸钠 SA+8% 聚乙烯醇 PVA) 混合均匀, 形成混合液与凝胶剂体积比为 2% 的混合液; 用注射器吸取一定量的上述混合液, 套上 8 号针头, 匀速滴入预冷的交联剂 (2% CaCl₂+4.5% H₃BO₃) 溶液中, 形成一定数量的 CAMI 菌藻固定化胶球, 胶球在 CaCl₂ 溶液中静置 4 h 后备用。

(2) 固定化 EM 藻菌 (即小球藻与 EM 菌混合固定 *Chlorella pyrenoidosa* and Effective Microorganisms, CEMI): 取一定体积的藻类细胞浓缩液与经复壮扩大培养的 EM 菌液进行等体积比例混合, 再按照 (1) 的步骤使其固定后形成一定数量的 CEMI 菌藻固定化胶球, 静置待用。

(3) 小球藻与 EM-活性污泥联合固定 (*Chlorella*

pyrenoidosa and EM- Activated sludge, CEAMI): 先将一定量的 EM 菌与活性污泥等体积比例混合, 搅拌均匀形成 EM-活性污泥混合液。再取该混合液与小球藻浓缩液进行等体积比例混合, 再按照(1)混合固定法步骤使其固定后形成一定数量的 CEMI 菌藻固定化胶球, 静置待用。

(4)无包埋胶球(No Mix and stratify immobilization, NM): 即胶球中不包埋小球藻液、活性污泥、EM 菌, 只由海藻酸钠、CaCl₂ 两种材料组成, 作为对照组用于参比实验。

以上 4 种藻菌胶球直径为(4.00±0.29)mm, 均能满足实验的需要。

1.3.2 对照实验方法

在 4 个长 5 m、宽 0.2 m、深 0.5 m, 且底为弧型的室内环型氧化沟跑道中分别注入实验用珍珠蚌养殖废水, 使静置水深为 0.3 m, 再分别加入 CAMI 藻菌胶球、CEMI 藻菌胶球, CEAMI 藻菌胶球及无藻菌胶球(NM), 填充率均为 10%, 以无藻菌胶球(NM)为参比组, 采用 GE 高光通纳灯(南京奇正照明有限公司生产, 型号 XO-E27)作为光源, 光谱范围(540±21)nm、光照强度 5 000 lx、温度 25 ℃、水力负荷 0.1 m·s⁻¹(此时藻菌胶球主要悬浮于距水面 0~20 cm 处), 光暗比 12:12 条件下进行废水处理 96 h, 每隔 8 h 取样测 1 次 TN 和 TP 浓度。讨论实验数据结果和组间去 N、P 数据差异的显著性(采用 SPSS12.0 分析软件, 以 $P<0.05$ 为具显著性差异)。

1.3.3 光强对去除氮磷的影响。

改变光照强度, 将光强分别控制为 2 000、3 000、

4 000、5 000、6 000、7 000 lx。除光强外, 其他环境因子条件同 1.3.2, 持续培养 96 h, 测定 TN 和 TP 浓度。测定方法及结果表示同 1.3.2。

1.3.4 温度对去除氮磷的影响。

改变实验温度, 用恒温加热器将温度依次控制在 10、15、20、25、30、35、40 ℃, 其他因子条件同 1.3.2, 持续培养 96 h, 测定 TN 和 TP 浓度。测定方法及结果表示同 1.3.2。

2 结果与讨论

2.1 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌及 NM 对 TN、TP 的去除效果

藻菌固定化技术去除废水中的 N、P, 利用了包埋胶球疏松多孔的特性, 将废水中 N、P 营养元素吸附在包埋材料表面, 再由藻菌通过一系列生化活动将 N、P 去除。表 2 为 CAMI 藻菌、CEMI 藻菌、CEAMI 藻菌及 NM 胶球对珍珠蚌养殖废水中氮磷的去除效果。可以看出, 在处理 8 h 后, CEAMI、CAMI 的 TN 去除率分别为 30.14%、31.47%, 而 CEMI 的 TN 去除率为 10.15%, 与前两者的差异较大; 当处理 40 h 后, CEAMI、CAMI 的 TN 去除率分别达到 73.74%、75.08%, CEMI 的 TN 去除率仅为 33.45%。对 8~40 h 段所测得的 3 组数据进行独立样本 T 检验, 得到 CAMI 与 CEMI 数据组之间均值差异显著值 sig. 为 0.008, CEAMI 与 CEMI 数据组之间均值差异显著值 sig. 为 0.010, CAMI 与 CEAMI 数据组之间均值差异显著值 sig. 为 0.803。说明 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌在设计条件下对珍珠蚌养殖废水 TN 的处理过程中, CEMI 藻菌与 CAMI、

表 2 CAMI 藻菌、CEMI 藻菌、CEAMI 藻菌及 NM 胶球对氮磷的去除效果(%)
Table 2 Effects of algae-bacteria CAMI, CEMI, CEAMI and NM respectively on removing nitrogen or phosphorus(%)

处理时间/h	CEAMI		CAMI		CEMI		NM(参比)	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
8	30.14±3.85	23.17±6.01	31.47±4.76	27.15±7.32	10.15±7.71	24.67±5.85	1.03±0.04	0.44±0.01
16	43.57±0.45	30.14±3.85	47.97±8.31	32.54±1.05	14.38±1.59	30.14±7.43	1.10±0.10	0.45±0.01
24	51.39±7.83	44.38±11.42	56.55±1.02	46.10±6.43	17.74±6.30	45.13±8.62	1.10±0.01	0.45±0.02
32	66.42±1.17	53.11±5.32	68.28±2.78	53.81±9.40	24.34±7.43	50.55±9.77	1.11±0.03	0.45±0.01
40	73.73±9.81	62.74±6.87	75.08±9.25	65.76±1.46	33.45±8.10	60.14±6.85	1.14±0.04	0.46±0.04
48	86.11±8.37	71.55±10.21	85.00±7.22	70.58±2.82	64.85±4.89	69.37±4.92	1.14±0.04	0.46±0.01
56	89.74±14.85	79.43±6.59	88.07±5.31	76.19±3.44	78.46±3.85	77.59±9.78	1.13±0.04	0.47±0.02
64	91.16±0.57	84.67±8.64	86.10±9.24	76.28±7.10	80.45±7.76	77.81±1.42	1.13±0.05	0.47±0.01
72	90.56±5.50	82.34±12.85	84.47±4.62	74.98±6.39	78.31±3.84	77.04±7.61	1.13±0.07	0.47±0.01
80	90.12±6.42	81.72±4.81	80.76±7.35	74.61±5.22	76.87±7.61	74.90±7.44	1.14±0.11	0.47±0.02
88	87.91±6.57	80.94±11.02	77.65±5.17	72.84±7.54	76.01±9.42	74.00±2.58	1.14±0.01	0.47±0.01
96	87.48±4.88	80.14±8.34	76.39±8.27	72.05±4.58	76.12±6.41	69.89±3.85	1.14±0.04	0.47±0.03

CEAMI 藻菌对氮的去除效果具有显著性差异。

当处理过程处于 40~56 h 时间段时,CEAMI 与 CAMI 对氮的去除率分别从 73.73%、75.08% 上升到 89.74%、88.07%,而 CEMI 的去除率从 33.45% 上升到 78.46%。在此 16 h 的处理时间内,CEMI 的 N 去除率明显加快,远远快于 CAEMI 和 CAMI,由此说明 CEMI 相对 CEAMI、CAMI 而言,在对 TN 的去除过程中有一个较长的“适应期”,其值约 40 h。这种“适应期”现象与朱亮等^[16]实验现象相吻合,但适应期明显短于朱亮等 72 h 的实验结果。产生“适应期”的原因可能是因为 EM 菌群中含有一定比例的酵母菌和乳酸菌,酵母菌主要利用植物或藻类产生的分泌物、光合菌合成的氨基酸、糖类及其他有机物质产生发酵力,而乳酸菌主要靠摄取光合细菌、酵母菌产生的糖类形成乳酸,所以处理初期 CEMI 藻菌去 N 主要是小球藻和光合细菌的作用,随着小球藻和光合细菌浓度的增加,酵母菌和乳酸菌群开始发挥效用,导致在 40~56 h 时间段去 N 速率陡然上升,而这种适应期长短的差距可能因为固定化作用所引起。

从表 2 可以看出,CAEMI 与 CEMI 在处理 64 h 左右去 N 率达到最大值,分别为 91.16%、80.45%,CAMI 在处理 56 h 左右去 N 率达到最大值 88.07%。随着处理时间的延长,三者的去 N 率不再上升,还有下降趋势,可能是由于后继营养元素的缺乏,部分藻菌解体死亡并释放出部分 N 源的缘故。从三者对 TN 的最终处理效果来看,CEAMI 的去 N 效果好于 CAMI, CAMI 去 N 效果好于 CEMI。经独立样本 *T* 检验,三者的最终去 N 效果无显著性差异。

从表 2 还可以看出,CEAMI、CAMI 和 CEMI 三者 8 h 的去 P 率分别为 23.17%、27.15% 和 24.67%,在处理 56~64 h 期间内,三者的去 P 率均达到最高值,分别为 84.67%、76.28% 和 77.81%,与程晓如等^[17]实验结

果非常近似。CAMI 和 CEMI 达到去 P 峰值的时间稍早于 CAEMI。在整个处理过程中,三者的去 P 效果无显著性差异。与去 N 过程相比,CEMI 的去 P 过程并没有出现“适应期”,这可能与在固定化藻菌体系中,藻类是去 P 的主要作用因子,由于 3 种固定胶球的小球藻含量比等同,从而在去 P 的过程中没有出现“适应期”现象。

对照组(参比)NM 的 TN 与 TP 的去除率分别为 1.14% 与 0.46%,说明在利用固定化藻菌去除珍珠蚌养殖废水 N、P 过程当中,在设计处理条件下包埋材料吸附及氨氮本身物理性挥发等对 TN、TP 去除贡献率分别为 1.14%、0.46%。

2.2 光强对 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌及 NM 去除氮磷的影响

表 3 为不同光照强度下珍珠蚌养殖污水经过 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌及 NM 持续处理 96 h 后氮、磷去除率的最大值结果。

从表 3 可以看出,当光照强度从 2 000 lx 提高到 5 000 lx 时,各处理 64 h 后 CEAMI、CAMI 和 CEMI 三者的 TN 去除率分别从 41.08%、32.33%、28.89% 上升到 90.11%、87.69%、81.64%,TP 去除率分别从 39.85%、37.12%、30.19% 上升到 83.49%、76.51%、77.24%,说明光照强度是三者脱氮去磷的重要影响因素。表 3 数据显示,在 2 000~5 000 lx 光强范围内,随着光照强度的加强,三者对 TN、TP 的去除率也不断上升,CEAMI 与 CAMI、CEMI 的去 N 效果均具有显著性差异,而 CAMI 与 CEMI 的去 N 效果无显著性差异,三者去 P 效果均无显著性差异。当光强处于 5 000 lx 以上时,三者的去 N、P 率不再上升,还稍有下降,说明在固定化藻菌体系中当藻菌所需的光照强度达到一定饱和(临界)状态时,增强光强也不能再提高 N、P 的去除率。在改变光强处理的整个过程中,

表 3 不同光强下 CAMI 藻菌、CEMI 藻菌、CEAMI 藻菌及 NM 胶球对氮磷的最佳去除效果(%)

Table 3 Effects of algae-bacteria CAMI, CEMI, CEAMI and NM respectively on removing N and P in different light intensity conditions(%)

光强条件		2 000 lx	3 000 lx	4 000 lx	5 000 lx	6 000 lx	7 000 lx
CEAMI	TN 去除率	41.08±4.82	78.04±3.75	91.41±1.57	90.11±8.42	90.81±5.41	89.17±0.59
	TP 去除率	39.85±3.31	61.07±1.22	70.91±1.96	83.49±5.54	83.47±9.57	83.44±3.25
CAMI	TN 去除率	32.33±4.16	56.91±5.17	71.28±0.47	87.69±4.31	84.85±6.01	85.01±3.27
	TP 去除率	37.12±9.15	50.75±1.56	65.73±3.75	76.51±1.75	75.24±1.55	75.38±6.98
CEMI	TN 去除率	28.89±9.21	51.01±5.16	69.70±1.08	81.64±6.14	81.79±4.77	80.10±6.31
	TP 去除率	30.19±0.50	58.46±3.58	61.97±2.74	77.26±1.62	76.78±0.48	76.43±1.11
NM(参比)	TN 去除率	1.14±0.59	1.14±1.05	1.15±0.57	1.14±0.88	1.14±1.12	1.15±0.97
	TP 去除率	0.48±0.01	0.47±0.01	0.47±0.02	0.46±0.11	0.47±0.03	0.47±0.05

CEAMI 在 4 000 lx 处去 N 率达到峰值 91.41%,而去 P 峰值 83.49%在 5 000 lx 处到达,CAMI 与 CEMI 的去 N、P 峰值均在 5 000 lx 处出现。邢丽贞等^[18]认为固定化藻菌去 N、P 最佳光照强度在 5 000~6 000 lx 区域,略高于本实验结论。

整体上看,不同光照强度条件下的去 N、P 效果 CEAMI 要强于 CAMI 与 CEMI。对照组 NM(参比)各光强下的 TN 与 TP 的去除率分别为 1.15%与 0.46%,说明光照强度对无包埋藻菌胶球的 N、P 去除能力没有影响。

2.3 温度对 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌及 NM 去除氮磷的影响

表 4 为不同温度条件下珍珠蚌养殖污水经过 CAMI、CEMI、CEAMI 藻菌及 NM 96 h 持续处理后去氮、磷率的最大值结果。

从表 4 可以看出,CEAMI、CAMI 和 CEMI 在不同温度条件下 N、P 的去除率差异很大,说明温度也是影响 CEAMI、CAMI 和 CEMI 三者对 N、P 去除的主要环境因子。表 4 数据显示 CEAMI、CAMI 和 CEMI 在 25 ℃时去 N 率均达到最高值,分别为 91.10%、88.09%、80.58%,而三者的去 P 率峰值(最高)均在 30 ℃出现,分别为 85.10%、79.69%、77.46%,说明 CEAMI、CAMI 和 CEMI 的最适去 N 温度在 25 ℃左右,而最适去 P 温度在 30 ℃左右。这可能与藻和菌的最适生长环境有关,小球藻的最适生长温度为 28~33 ℃^[19],EM 菌的最适生长温度处于 20~25 ℃,小球藻是去 P 的主要因子,菌群是去 N 的主要因子,从而导致共固定化藻菌的最适去 N、P 温度出现差异。该实验结论为有针对性地去去除废水中 N、P 提供了温度条件参考依据。从表 4 还可以看出,当温度低于 15 ℃或高于 35 ℃时,三者对珍珠蚌养殖废水 N、P 的去除率均低于 66%。对照组 NM(参比)各温度下的 TN 与 TP 的

去除率分别为 1.16%与 0.48%,说明温度的变化对无包埋藻菌胶球的去 N、P 能力无影响。

3 结论

(1)无论在实验设计条件下,还是在光照强度、温度变化条件下,CEAMI 藻菌对珍珠蚌养殖污水 N、P 的去除效果都要强于 CAMI 和 CEMI。

(2)在设计条件下,CEMI 前 40 h 对 N 的去除效果与 CEAMI 和 CAMI 存在显著性差异,该 40 h 为 CEMI 的特殊“适应期”。整个过程中对 P 的去除效果无显著性差异,也无“适应期”现象发生。

(3)光照强度是 CEAMI、CAMI 和 CEMI 脱氮去磷的重要环境因子,其中 CEAMI 的去 N 峰值(最高)在 4 000 lx 处,去 P 峰值在 5 000 lx 处,CAMI 和 CEMI 的去 N、P 峰值均在 5 000 lx 处。在 2 000~5 000 lx 光强范围内,CEAMI 与 CAMI、CEMI 的去 N 效果均具有显著性差异,去 P 效果无显著性差异。

(4)温度也是影响 CEAMI、CAMI 和 CEMI 三者对 N、P 去除的重要环境因子,三者最适去 N 温度为 25 ℃左右,最适去 P 温度在 30 ℃。

(5)对照组 NM(参比)的 TN 与 TP 的去除率分别处于 1.14%~1.16%与 0.46%~0.48%之间,光照强度和温度的改变对其去 N、P 能力无影响。

参考文献:

- [1] Tam N F Y, Wong Y S. Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal[J]. *Environmental Pollution*, 2000 (107):145-151.
- [2] Travieso L. Experiments on immobilization of microalgae for nutrient removal in wastewater treatment[J]. *Bioresource Techno*, 1996, 55(3): 181-186.
- [3] 张向阳. 固定化小球藻去除污水中氮、磷的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(1):95-101.
ZHANG Xiang -yang. Experimental study on removing nitrogen and

表 4 不同温度下 CAMI 藻菌、CEMI 藻菌、CEAMI 藻菌及 NM 胶球对氮磷的最佳去除效果(%)

Table 4 Effects of algae -bacteria CAMI,CEMI,CEAMI and NM respectively on removing N and P in different temperature conditions(%)

温度条件		15 ℃	20 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃	40 ℃
CEAMI	TN 去除率	60.24±4.17	75.84±10.40	91.10±2.55	87.79±1.87	61.91±1.25	40.34±7.14
	TP 去除率	58.11±4.22	76.52±1.15	83.14±0.77	85.10±7.14	60.40±7.71	41.41±2.34
CAMI	TN 去除率	55.45±4.28	75.30±4.75	88.59±1.71	83.23±1.57	64.56±7.23	45.97±10.47
	TP 去除率	54.41±1.00	71.71±3.15	76.72±3.16	79.69±9.47	58.50±2.47	31.82±3.47
CEMI	TN 去除率	41.03±5.89	72.54±10.04	80.58±2.11	80.06±9.25	65.07±1.47	33.41±11.64
	TP 去除率	50.34±4.89	68.10±7.09	72.19±2.80	77.46±10.87	60.11±1.92	37.52±2.39
NM(参比)	TN 去除率	1.16±2.31	1.15±0.47	1.15±0.10	1.16±0.87	1.16±0.01	1.16±0.12
	TP 去除率	0.47±0.21	0.48±0.07	0.47±0.04	0.48±0.13	0.48±0.01	0.47±0.06

- phosphorus from wastewater by immobilized chlorella[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(1):95-101.
- [4] 邹万生, 张景来, 刘良国, 等. 固定化藻菌去除淡水养殖废水氨氮效果研究及模型拟建[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(23):12650-12652.
- ZOU Wan-sheng, ZHANG Jing-lai, LIU Liang-guo, et al. Effect research of immobilized algae-bacteria removal ammonia nitrogen of aquaculture wastewater and proposed model[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23):12650-12652.
- [5] 韩士群. 固定化微生物对养殖水体浮游生物的影响及生物除氮研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(2):251-254.
- HAN Shi-qun. Effect of immobilized microbes on plankton and biodegradation in aquaculture water[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, 12(2):251-254.
- [6] 潘辉, 熊振湖, 孙炜. 共固定化菌藻对市政污水中氮磷的研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(1):14-16.
- PAN Hui, XIONG Zhen-hu, SUN Wei. Experimental study on removing nitrogen and phosphorus from municipal wastewater by immobilized chlorella[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(1):14-16.
- [7] 王爱丽, 宋志急, 王福明. 藻菌混合固定化及对污水的净化[J]. *环境污染与防治*, 2005, 9(27):654-657.
- WANG Ai-li, SONG Zhi-ji, WANG Fu-ming. Mixed immobilized bacteria and algae on sewage purification[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005, 9(27):654-657.
- [8] 比嘉照夫. 地球を救う大変革[M]. 東京:株式会社サンマーク出版, 1997:19.
- BI JiaZhao-fu. Save the earth and large leather[M]. Tokyo:サンマークCO. LTD Publishing, 1997:19.
- [9] 马占青, 娄保锋. 有机废水有效微生物处理实验研究[J]. *环境污染与防治*, 2000, 22(5):6-9.
- MA Zhan-qing, LOU Bao-feng. Studied of apply effective microorganisms(EM) removal organic wastewater[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2000, 22(5):6-9.
- [10] 马占青, 顾宏余, 温淑瑶. 有效微生物废水处理动态实验研究[J]. *环境污染与防治*, 2001, 23(4):195-197.
- MA Zhan-qing, GU Hong-yu, WEN Shu-yao. Dynamic experiment of apply effective microorganisms(EM) removal wastewater[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2001, 23(4):195-197.
- [11] 王平, 吴晓芙, 李科林, 等. 应用有效微生物群(EM)处理富营养化源水试验研究[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(3):39-43.
- WANG Ping, WU Xiao-fu, LI Ke-lin, et al. Studied of apply effective microorganisms(EM) removal eutrophic source water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(3):39-43.
- [12] 邵青. EM对生活污水中常见污染物的去除效果[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(3):74-76.
- SHAO Qing. Effect of EM remove common pollutants in sewage[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(3):74-76.
- [13] Kuhl A, Zur. Physiologie der speicherung kondensierter anorganischer phosphate in chlorella[M]. Stuttgart:Fischer Verlag, 1962:157-166.
- [14] 孙少晨, 林永波, 寇广孝. 包埋法固定化细胞技术及其在水处理中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2006, 31(4):95-97.
- SUN Shao-chen, LIN Yong-bo, KOU Guang-xiao. Study on entrapping method and its application in water treatment[J]. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(4):95-97.
- [15] 陈娟, 刘雷. 藻类固定化技术研究概况及发展趋势[J]. *江西化工*, 2007, 6(2):27-29.
- CHEN Juan, LIU Lei. The technique of immobilization research situation and development trend[J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2007, 6(2):27-29.
- [16] 朱亮, 朱雪诞. EM菌在活性污泥系统中的实验研究[J]. *工业水处理*, 2010, 21(10):13-15.
- ZHU Liang, ZHU Xue-dan. Experimental researches of EM in activated sludge system[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, 21(10):13-15.
- [17] 程晓如, 陈永祥, 孙迎霞. EM菌强化SBR脱氮去磷的试验研究[J]. *重庆环境科学*, 2002, 24(5):55-57.
- CHENG Xiao-ru, CHEN Yong-xiang, SUN Ying-xia. Experimental research on effect of effective microorganisms enhancing the removal of TP and N in SBR process[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(5):55-57.
- [18] 邢丽贞, 张向阳, 张波, 等. 藻菌固定化去除污水中氮磷营养物质的初步研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 1(1):33-35.
- XING Li-zhen, ZHANG Xiang-yang, ZHANG Bo, et al. A preliminary study on eliminating nitrogen and phosphorus from artificial wastewater by immobilized bacteria-algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 1(1):33-35.
- [19] 黄国兰, 孙红文, 宋志慧, 等. 固定化藻类的生理特征和对染料的脱色能力研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(4):445-449.
- HUANG Guo-lan, SUN Hong-wen, SONG Zhi-hui, et al. Study on physiological characteristics and dye decolorization ability of immobilized algae[J]. *ACTA Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):445-449.
- [20] 王佳. 固定化藻菌的小球浓度对模拟生活污水脱氮除磷效果的影响[J]. *水资源保护*, 2005, 21(1):72-74.
- WANG Jia. Effect of cell concentration on the removal of nitrogen and phosphorus in synthetic wastewater by the immobilized algal-bacterial system[J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(1):72-74.
- [21] Sorokin C. Tabular comparative data for the low and high-temperature-strains of chlorella[J]. *Nature*, 1959, 184:613-614.