

固定化藻菌对水产养殖废水氮、磷的去除效果

邹万生^{1,2}, 刘良国¹, 张景来², 杨品红¹, 尹富士³ (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. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100081)

摘要: 对比研究了藻菌混合包埋(MI)和藻菌分层包埋(SI₁(藻外菌内)、SI₂(藻内菌外))固定化藻菌对养殖废水中氮、磷的去除效果, 以及光照、温度对3种处理脱氮去磷的影响。试验结果表明, 在设计条件下处理72 h MI与SI₁对氮的去除率分别为91.20%和90.77%, 显著高于SI₂。MI与SI₁的去磷效果显著强于SI₂, 处理72 h后2者对磷的去除率分别为90.31%和84.78%, SI₂仅为32.09%。当[光]照度<6 000 lx时, SI₂氮去除率在88%以上, 显著高于MI与SI₁; [光]照度>6 000 lx时, SI₂与MI对氮的去除率均高于89%, 显著高于SI₁。MI与SI₁对磷的去除率在85%以上, 显著高于SI₂。MI、SI₁、SI₂去除氮、磷的最佳温度为20~30℃。

关键词: 混合包埋; 分层包埋; 固定化藻菌; 水产养殖废水; 氮; 磷; 去除率

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4831(2010)06-0574-05

Effect of Immobilized Algae-Bacteria Removing Nitrogen and Phosphorus From Aquacultural Wastewater. ZOU Wan-sheng^{1,2}, LIU Liang-guo¹, ZHANG Jing-lai², YANG Pin-hong¹, YIN Fu-shi³ (1. College of Life Sciences Hunan University of Arts and Sciences Changde 415000, China; 2. School of Environment and Natural Resources Renmin University of China Beijing 100872, China; 3. Plant Protection Institute the Chinese Academy of Agricultural Sciences Beijing 100081, China)

Abstract: A comparison study was carried out on effects of mixing-immobilization (MI) and stratifying-immobilization (SI) of algae and bacteria removing nitrogen and phosphorus from aquacultural wastewater and influence of light intensity and temperature on the effects. Stratifying-immobilization was done in two forms SI₁ and SI₂. The former had algae in the outer layer and bacteria in the inner one whereas the latter did reversely. Results show that under given conditions for 72 h MI and SI₁ removed 91.20% and 90.77%, respectively of the nitrogen in the wastewater while SI₂ did only 60.4%. However MI and SI₁ were much better in removing phosphorus than SI₂, MI and SI₁ was 90.31% and 84.78%, respectively in phosphorus removal rate whereas SI₂ was only 32.09%. When light intensity was set at <6 000 lx the nitrogen removal rate of SI₂ was over 88%, much higher than that of MI and SI₁ (80%); and when light intensity was high enough (>6 000 lx), the nitrogen removal rates of both SI₂ or MI were over 89%, higher than that of SI₁. The optimal temperature for nitrogen and phosphorus removal was 20~30℃ in all the three treatments MI, SI₁ and SI₂.

Key words: mixing-immobilization; stratifying-immobilization; algae-bacteria immobilization; aquaculture wastewater; nitrogen; phosphorus; removal rate

藻菌固定化(algae-bacteria immobilization, ABI)技术是一门从生物技术领域延伸开来的新兴技术, 它主要是利用菌和藻的协同作用, 通过适当的技术处理来净化被污染的废水, 以去除废水中的污染物质。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, 目前在污水处理方面得到比较广泛地应用^[1-6]。固定化方法是决定藻菌体系去污效果的关键因素之一, 不同的固定化方法处理废水的效果有较大的差别。笔者通过试验设计, 采取不同的藻菌固定化方法处理水产养殖废水, 对比考察其对养殖废水中氮、磷污染物的去除效果。

1 材料与方法

1.1 材料选用及培养

试验选用蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*), 藻种由中国科学院武汉水生生物研究所藻种库提供; 培养基配方选用 K₁H₁培养基^[7]; 由于活性污泥中富含多种脱氮去磷细菌群, 因此试验所用细菌选用活性污泥替代, 活性污泥由湖南省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

基金项目: 国家自然科学基金(30972260); 国家公益性行业(农业)科研专项(200903028-08)

收稿日期: 2010-05-04

菌、脱氮硫杆菌和聚磷菌为优势菌。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,置放在温度 25 °C、[光]照度 6 000 lx、光暗比 12 h:12 h 的生化培养箱中培养待用。在 10 L 待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。

1.2 水产养殖废水选取及配制

水产养殖废水取自湖南省常德市大湖股份有限公司种鱼基地池塘,检测废水指标时先用 0.45 μm 孔径醋酸纤维膜过滤预处理,各指标测定方法如下: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;总磷测定采用钼锑抗分光光度法,以磷酸根计。每个指标重复测 3 次,以平均值加减标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示。试验测得废水主要水质指标为: $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$, (350.80 ± 12.55) mg · L⁻¹; 浊度 (NTU), 14.60 ± 2.37; $\rho(\text{TN})$, (35.10 ± 2.41) mg · L⁻¹; $\rho(\text{TP})$, (5.50 ± 0.35) mg · L⁻¹。

需另加的其他化学试剂参照 Kuhl 培养基配方配制,其中的氮源和磷源由鱼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 试验方法

1.3.1 藻菌固定方法^[8-9]

藻菌混合包埋 (mix-immobilization MI): 将培养后的小球藻离心浓缩,弃去上清液,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,再与预先已经灭菌的质量分数 5% 海藻酸钠溶液均匀混合,形成体积比 2% 的混合液;用注射器分别吸取一定量的上述混合液,套上 8 号针头,匀速滴入预冷的饱和 CaCl₂ 溶液,即形成一定直径、一定数量的菌藻固定化胶球,胶球在 CaCl₂ 溶液中静置 8 h 后备用。

藻菌分层包埋 (stratify-immobilization SI): 包括 SI₁ 与 SI₂ 2 种。SI₁ 先将活性污泥的浓缩液 (与混合包埋量等同) 与质量分数 5% 海藻酸钠混匀,用带 5 号针头注射器吸取混合液滴入饱和 CaCl₂ 溶液,然后将其形成的小胶球置入浓缩的小球藻液 (与混合包埋量等同) 中并搅拌,再次与质量分数 5% 海藻酸钠溶液混合均匀,最终移入饱和 CaCl₂ 溶液中,制成内层为海藻酸钠包埋活性污泥的浓缩菌,外层为包埋小球藻的复合胶球。胶球在 CaCl₂ 溶液中静置 8 h 后待用。SI₂ 将小球藻液与活性污泥固定的顺序反转,即小球藻被固定在胶球内层,活性污泥被固定在外层。

无包埋胶球 (no mix and stratify immobilization NM): 胶球中不包埋小球藻液与活性污泥,只由海藻酸钠和 CaCl₂ 2 种材料组成。

以上 4 种藻菌胶球直径均为 (4.00 ± 0.29) mm,能满足预期试验的需要。

1.3.2 对照试验设计与方法

在 4 个长 10.0 m、宽 0.3 m、深 0.8 m、底为弧型的室内环型氧化沟跑道中分别注入水产养殖废水,使静置水深为 0.50 m,再分别加入藻菌 MI、SI₁、SI₂ 和 NM,填充率均为 10%。以 NM 为参比组,在 [光]照度 6 000 lx、温度 25 °C、水力负荷 0.1 m · s⁻¹ (此时藻菌胶球主要悬浮于距水面 0~25 cm 深处)、光暗比 12 h:12 h 条件下进行培养,每 6 h 取样测 TN 和 TP 浓度。每指标重复测 3 次,试验结果以平均值加减标准差 ($\bar{x} \pm s$) 形式表示。

1.3.3 光照对藻菌 MI、SI₁、SI₂ 及 NM 去除氮、磷的影响

改变光照强度,[光]照度分别控制为 2 000、4 000、6 000、8 000、10 000、12 000 lx 其他环境因子条件同 1.3.2 节,持续培养 72 h 测定 TN 和 TP 浓度,测定方法及结果表示同 1.3.2 节。

1.3.4 温度对藻菌 MI、SI₁、SI₂ 及 NM 去除氮、磷的影响

改变试验温度,用恒温加热器将温度依次控制在 10、15、20、25、30、35、40 °C,除温度外,其他因子条件同 1.3.2 节,持续培养 72 h 测定 TN 和 TP 浓度,测定方法及结果表示同 1.3.2 节。

2 结果与讨论

2.1 藻菌 MI、SI₁、SI₂ 及 NM 对氮、磷的去除效果

从表 1 可以看出,养殖废水经过 72 h 处理后,藻菌混合包埋 (MI) 固定化藻菌对氮的去除率均值为 91.20%,对磷的去除率为 90.31%;藻菌分层包埋 (SI₁) 固定化藻菌对氮的去除率为 60.42%,对磷的去除率为 84.78%;藻菌分层包埋 (SI₂) 固定化藻菌对氮的去除率为 90.77%,对磷的去除率为 32.09%;无包埋胶球 (NM) 对氮、磷的去除率仅分别为 1.16% 和 0.47%。

藻菌固定化技术利用了包埋胶球疏松多孔的特性,将废水中氮、磷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氮、磷去除。藻菌 MI、SI₁、SI₂ 对养殖废水中氮、磷去除效果产生差异的原因可能是小球藻和细菌分别是去除磷和氮的主要因子^[10]。

表 1 藻菌 MI、SI₁、SI₂ 对氮、磷去除效果的动态变化

Table 1 Dynamics of N and P removal rates of the algae-bacteria treatments (MI, SI₁ and SI₂)

t/h	氮去除率 /%				磷去除率 /%			
	MI	SI ₁	SI ₂	NM	MI	SI ₁	SI ₂	NM
6	25.31±1.03	23.41±6.24	24.05±4.15	1.03±0.01	18.14±2.53	22.47±8.15	11.20±0.89	0.44±0.01
12	41.05±3.12	32.09±2.81	36.71±8.10	1.10±0.01	30.63±5.14	37.30±0.49	14.27±2.31	0.45±0.01
18	45.22±3.05	34.29±12.41	42.26±1.25	1.10±0.02	37.26±0.57	40.38±6.15	20.13±4.28	0.45±0.02
24	53.74±2.63	37.17±6.31	49.67±3.14	1.11±0.10	43.83±1.29	44.47±2.14	24.18±4.20	0.46±0.04
30	60.46±8.39	42.45±7.43	58.94±0.79	1.14±0.07	50.06±2.11	48.10±1.43	26.34±1.00	0.46±0.02
36	69.38±10.45	48.62±5.77	66.23±2.31	1.15±0.01	55.79±1.84	54.84±2.13	29.10±3.84	0.46±0.01
42	75.76±3.13	53.46±0.17	71.81±3.38	1.15±0.07	61.18±0.55	60.74±10.59	21.39±1.95	0.47±0.01
48	83.90±4.13	55.87±4.28	77.55±1.34	1.15±0.08	69.41±3.87	62.41±3.49	27.03±4.05	0.47±0.02
54	85.16±3.58	59.09±7.64	83.16±2.77	1.16±0.01	74.59±2.13	65.34±2.26	30.44±8.34	0.47±0.01
60	87.85±1.09	59.64±5.94	86.10±0.48	1.16±0.10	80.74±5.23	70.91±0.59	31.15±1.97	0.47±0.01
66	89.49±2.87	59.73±2.57	88.19±1.95	1.16±0.05	85.28±4.05	76.49±7.48	31.80±6.71	0.47±0.01
72	91.20±1.82	60.42±1.73	90.77±2.11	1.16±0.02	90.31±4.51	84.78±1.08	32.09±2.89	0.47±0.02

MI为藻菌混合包埋胶球; SI₁与 SI₂为藻菌分层包埋胶球 (SI₁为活性污泥被固定在胶球内层, SI₂为小球藻被固定在胶球内层); NM为对照, 无包埋胶球。

从对氮的去除效果来看, MI与 SI₂的效果远强于 SI₁。在整个养殖废水处理过程中, 采用混合包埋 (MI)的小球藻和细菌整体上与废水中氮源的接触机率是均等的。表层 MI胶球中小球藻通过光合作用将氮源转化为自身的一部分, 同时释放出 O₂, 为细菌微生物中好氧菌的生长提供了丰富的氧源环境, 好氧菌将部分氮、磷转化为自身的一部分, 底层的 MI厌氧菌通过反硝化等一系列生化活动将部分氮以 N₂形式从废水中去除, 同时释放出的 CO₂能为小球藻所利用, 整个过程中, 部分氮源被藻菌同化, 因而混合包埋 (MI)固定化藻菌落是一个优势互补的体系^[11-12]。在藻菌分层包埋 (SI₁)固定化藻菌落中, 活性细菌被包埋在中间, 与废水中氮源的接触机率远小于 MI硝化过程所需的 O₂源虽充足, 但胶球内部 O₂浓度较低, 好氧菌的生化活动程度明显下降, 此时厌氧菌处于优势菌地位, 但整体细菌群生化活动程度下降, 这些因素制约了废水中氮的去除。藻菌分层包埋 (SI₂)固定化藻菌落中小球藻被包埋在胶球内部, 光合作用程度较低, 但此包埋法 72 h后的氮去除率达 90.77%, 与 MI包埋法很接近。

从对磷的去除效果来看, MI与 SI₁藻菌对磷的去除效果在整个处理过程中都非常接近, 处理 72 h后对磷的去除率分别为 90.31%和 84.78%, 但 SI₂藻菌对磷的去除率却仅为 32.09%, 远低于 MI和 SI₁。这与废水中磷元素主要由小球藻吸收利用有关, 当养殖废水中碳、氮等营养物质充足时, 磷的去除率主要取决于磷与小球藻的接触面积, 很显然, SI₁与 MI固定化藻菌小球藻比 SI₂更易于与废水中磷源接触。

对 MI、SI₁、SI₂氮去除率进行独立样本 t检验, 结果表明, MI与 SI₁差异显著 (P=0.013<0.05); MI与 SI₂无显著性差异 (P=0.317); SI₁与 SI₂差异显著 (P=0.010)。对磷去除率的独立样本 t检验结果表明, MI与 SI₁无显著性差异 (P=0.768); MI、SI₁分别与 SI₂差异显著 (P=0.019, P=0.024)。综合看去除氮、磷的效果, MI明显好于 SI₁与 SI₂。

参比组 NM胶球中没有能与氮化合物发生化学反应的物质, 主要通过废水氨氮物理性挥发、材料吸附作用使部分氮、磷去除, 其对氮、磷的去除率为 1.16%和 0.47%。

2.2 光照对藻菌 MI、SI₁、SI₂及 NM去除氮、磷的影响

蛋白核小球藻属于绿球藻目小球藻科小球藻属, 需要在光照条件下进行光合作用。不同光照强度下处理 72 h后藻菌 MI、SI₁、SI₂对氮、磷的去除效果见表 2。

从表 2可以看出, 光照强度对藻菌 MI、SI₁、SI₂的氮、磷去除效果都有一定影响。在 [光]照度为 2 000 lx条件下处理 72 h混合包埋 (MI)固定化藻菌与分层包埋 (SI₁)固定化藻菌氮去除率分别为 41.08%和 32.33%, 磷去除率分别为 39.85%和 37.12%, 但分层包埋 (SI₂)固定化藻菌的氮去除率达 88.89%, 而磷去除率仅为 28.19%。随着 [光]照度的不断增加, MI、SI₁对氮、磷的去除率不断上升, 在 6 000 lx时, 处理 72 h后其氮去除率分别为 91.41%和 60.28%, 磷去除率分别为 90.91%和 85.73%, 而 SI₂对氮、磷的去除效果随 [光]照度的变化不明显。[光]照度的变化对 NM没有影响。

表 2 不同 [光] 照度下藻菌 M_I、S_I、S_L 的氮、磷去除效果

Table 2 Effect of light intensity on N and P removal rates of the algae-bacteria treatments (M_I, S_I and S_L)

[光]照度 /k	氮去除率 /%				磷去除率 /%			
	M _I	S _I	S _L	NM	M _I	S _I	S _L	NM
2 000	41.08±4.12	32.33±4.16	88.89±9.21	1.16±0.59	39.85±3.31	37.12±9.74	28.19±0.59	0.48±0.01
4 000	78.04±3.14	46.91±5.17	91.01±5.16	1.16±1.05	61.07±1.22	60.75±1.56	28.46±1.30	0.47±0.01
6 000	91.41±1.57	60.28±0.79	90.70±1.08	1.16±0.57	90.91±1.96	85.73±3.05	31.97±2.74	0.47±0.02
8 000	92.11±8.42	59.69±4.37	89.64±6.14	1.16±0.88	91.49±5.54	85.51±1.42	32.26±1.63	0.48±0.11
10 000	92.81±5.41	59.77±6.01	88.79±4.44	1.16±1.12	91.15±9.57	85.24±1.55	31.78±0.48	0.47±0.03
12 000	93.17±0.59	60.89±3.27	90.10±6.31	1.16±0.97	92.44±3.25	85.38±6.98	32.43±1.11	0.47±0.05

M_I为藻菌混合包埋胶球; S_I与 S_L为藻菌分层包埋胶球(S_I为活性污泥被固定在胶球内层, S_L为小球藻被固定在胶球内层); NM为对照, 无包埋胶球。

在 6 000 k 以下时, 随着 [光] 照度的减弱, 藻菌 M_I 和 S_I 的氮去除率差距不断缩小, 说明在 [光] 照度较弱的条件下, 这 2 种包埋法固定化藻菌对氮的去除主要取决于活性细菌的生化活动, 氮源渗透穿越 M_I 固定化藻菌胶球的时间比 S_I 短, 而活性细菌的生化活动产物与胶球外界交换的时间却比 S_I 长, 所以 M_I 固定化藻菌的去氮率始终高于 S_I。随着 [光] 照度的增加, 小球藻的光合作用逐渐加快, M_I 和 S_I 氮去除率也不断上升, 直到一个稳定的去氮水平; 而 [光] 照度改变对 S_L 去除氮的影响不大, 始终维持在一个稳定水平。在 6 000 k 以下时, 随着 [光] 照度的增强, M_I 与 S_I 磷去除率相应上升, 而 S_L 磷去除率较低, 且随光照强度的变化幅度较小。这进一步说明了胶球中的小球藻是去除磷的主要因子。

对不同 [光] 照度下 M_I、S_I、S_L 氮、磷去除率进行独立样本 t 检验, 结果表明, M_I 与 S_I 去氮效果差

异显著 (P=0.018<0.05), 去磷效果无显著性差异 (P=0.770); 当 [光] 照度 < 6 000 k 时, M_I 与 S_L 去氮效果存在显著差异 (P=0.019), [光] 照度 > 6 000 k 时, 2 者无显著差异 (P=0.630); S_I 与 S_L 去氮效果差异显著 (P=0.025); M_I、S_I 分别与 S_L 去磷效果差异显著 (P=0.020, P=0.011)。

因此, 综合看去氮、磷效果, 含不同浓度氮、磷的养殖废水需采用不同的藻菌包埋方式, 高氮浓度的养殖废水宜采用 S_L, 高磷浓度则宜采用 M_I 且对光照强度要求较高。

2.3 温度对藻菌 M_I、S_I、S_L 及 NM 去除氮、磷的影响

温度是活性污泥菌和小球藻必不可少的生存环境因子, 其生长繁殖、脱氮去磷很大程度上受到温度的影响。不同温度条件下处理 72 h 后藻菌 M_I、S_I、S_L 对氮、磷的去除效果见表 3。

表 3 不同温度下藻菌 M_I、S_I、S_L 对氮、磷的去除效果

Table 3 Effect of temperature on N and P removal rates of the algae-bacteria treatments (M_I, S_I and S_L)

温度 /°C	氮去除率 /%				磷去除率 /%			
	M _I	S _I	S _L	NM	M _I	S _I	S _L	NM
10	50.41±3.28	29.87±5.91	47.19±3.47	1.15±0.87	43.26±3.48	50.43±5.54	14.25±4.48	0.47±0.01
15	60.24±4.13	35.55±4.28	61.03±5.89	1.16±2.31	68.11±4.05	70.41±1.00	20.34±4.89	0.47±0.21
20	72.84±10.20	45.30±4.14	74.54±10.04	1.15±0.47	86.52±1.07	86.71±3.03	26.10±7.09	0.48±0.07
25	91.10±2.55	60.59±1.71	90.18±2.11	1.15±0.10	90.14±0.77	84.72±3.16	32.19±2.80	0.47±0.04
30	85.79±1.58	50.23±1.73	87.56±9.25	1.16±0.87	87.10±7.14	76.69±9.97	30.46±10.87	0.48±0.13
35	81.91±8.25	44.56±1.23	86.07±1.47	1.16±0.01	70.40±1.52	70.50±2.47	30.11±1.92	0.48±0.01
40	67.34±7.18	30.97±10.45	70.41±11.64	1.16±0.12	51.41±2.34	52.82±3.47	27.52±2.39	0.47±0.06

M_I为藻菌混合包埋胶球; S_I与 S_L为藻菌分层包埋胶球(S_I为活性污泥被固定在胶球内层, S_L为小球藻被固定在胶球内层); NM为对照, 无包埋胶球。

从表 3 可以看出, 温度为 10 °C 时, 处理 72 h 后藻菌 M_I、S_I 与 S_L 氮去除率分别为 50.41%、29.87% 和 47.19%; 此后随着温度的升高均不断上升, 在温度为 25 °C 时, 3 者的氮去除率均达到最大

值, 分别为 91.10%、60.59% 和 90.18%; 此后随着温度的再次上升, 去氮率开始下降。不同温度条件下 M_I 与 S_L 的氮去除率十分接近, 均明显高于 S_I。

从整体来看, 随着温度的上升, 3 者对氮、磷的

去除率不断上升,当温度处于 20~30℃ 范围时,3 者的氮、磷去除率都接近峰值,再提高试验温度时,3 者的氮、磷去除率均逐步下降。这说明 3 者去除废水中氮、磷的最佳温度范围均为 20~30℃,SO-ROK N^[13]认为小球藻生长的最适宜温度为 25~32℃,说明适宜的温度是固定化藻菌去除氮、磷的必要条件。

从不同温度条件下的总体效果来看,藻菌 MI 去氮效果强于 SI 和 SL,SI 去磷效果稍强于 MI 远强于 SL。温度的变化对 NM 影响不明显。

对在不同温度下 MI、SI 和 SL 的氮、磷去除率进行独立样本 t 检验,结果表明,MI 与 SI 去氮效果存在显著性差异 ($P=0.002<0.05$),去磷效果无显著性差异 ($P=0.911$);MI 与 SL 去氮效果无显著差异 ($P=0.710$),去磷效果存在显著性差异 ($P=0.017$);SI 与 SL 的去氮、磷效果均具有显著性差异。

3 结论

(1) 在小球藻与活性污泥菌最适宜环境条件下,就去除养殖废水中氮源而言,混合包埋 (MI) 固定化藻菌与分层包埋 (SL) 固定化藻菌效果明显好于分层包埋 (SI) 固定化藻菌,试验结果表明在设计条件下处理 72 h MI 与 SL 氮去除率分别为 91.20% 和 90.77%,SI 仅为 60.4%,且与前 2 者去氮效果存在显著性差异。MI 与 SI 2 种包埋法的去磷效果强于 SL,处理 72 h 前 2 者磷去除率分别为 90.31%、84.78%,SL 磷去除率为 32.09%,且与前 2 者存在显著性差异。高氮养殖废水宜使用 SL 与 MI 方法包埋藻菌,高磷养殖废水宜使用 SI 与 MI 方法包埋藻菌。

(2) 当 [光] 照度在 6 000 lx 以下时,SL 氮去除率在 88% 以上,MI 与 SI 氮去除率均低于 80%,且均与 SL 存在显著差异;当 [光] 照度高于 6 000 lx 时,SL 与 MI 氮去除率均高于 89%,而 SI 低于 61%,且与前 2 者具有显著差异。MI 与 SI 磷去除率在 85% 以上,SL 低于 33%,且与前 2 者均具有显

著性差异。当光照不足时,可以采取 SL 包埋方法去除废水中的氮源;光照充足时,可以采用 SI 或 MI 包埋方法除氮。

(3) 温度对混合包埋 (MI) 固定化藻菌和分层包埋 (SI 与 SL) 固定化藻菌去除氮、磷的效果均有影响,3 者去除氮、磷的最佳温度范围为 20~30℃。

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(1): 145-151.
- [2] TRAVIESO L, BENITEZ F, WEILAND P, et al. Experiments on Immobilization of Microalgae for Nutrient Removal in Wastewater Treatment [J]. *Bioresour Technol*, 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.
- [4] 韩士群, 范成新, 严少华, 等. 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.
- [5] 潘辉, 熊振湖, 孙炜. 共固定化菌藻对市政污水中氮磷去除的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(1): 14-16.
- [6] 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.
- [7] KUHLE A. Zur Physiologie der Speicherung Kondensierter Anorganischer Phosphate in Chlorella [M]. Stuttgart: Fischer-Verlag, 1962, 157-166.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 固定化菌藻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.
- [11] 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.
- [12] 黄国兰, 孙红文. 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.
- [13] SOROKIN C. Tabular Comparative Data for the Low- and High-Temperature Strains of Chlorella [J]. *Nature*, 1959, 184(4686): 613-614.

作者简介: 邹万生 (1975-), 男, 湖南新化人, 硕士生, 主要从事水污染控制技术方面的研究。E-mail: zwskys@163.com