

高岩, 张力, 王岩, 等. 春季微生物固定化技术原位净化污染河塘的效果[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 334-341.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.018

## 春季微生物固定化技术原位净化污染河塘的效果

高岩<sup>1</sup>, 张力<sup>1</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 罗佳<sup>1</sup>, 王栋<sup>2</sup>, 严少华<sup>1</sup>, 张振华<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 无锡中科活力生物技术有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 利用微生物固定化技术原位净化污水是当前的研究热点之一, 为明确其在低温条件下的效果, 在亚热带地区温度较低的3月份至5月份, 采用该技术对富营养化河塘进行净化, 监测水质变化。结果表明: 采用该技术后水体的氨氮、总溶解氮、可溶性正磷酸盐、总溶解磷浓度较进水口明显降低, 在入水氮、磷负荷上升的情况下, 仍保持着总体下降的趋势; 此技术对总氮、总磷的去除效果没有对总溶解氮、总溶解磷的净化效果明显; 采用该技术后, 河塘水体高锰酸盐指数稳步下降。说明, 在亚热带地区温度相对较低的春季, 微生物固定化技术可以用于原位净化城市生活污水污染的富营养化河塘。

**关键词:** 微生物固定化技术; 污水净化; 富营养化

**中图分类号:** X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)02-0334-08

## Purification of polluted pond *in situ* by microorganism immobilization technology in spring

GAO Yan<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Wuxi Zhongke Huoli Biotechnology Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

**Abstract:** The contamination of water in urban rivers and ponds is becoming an increasingly serious problem in China. Research of using microorganism immobilization technology to treat contaminated water is currently one of the hot topics, but little study has been made on *in-situ* treatment of the domestic wastewater in low temperature seasons. In the present study, a eutrophic pond receiving domestic wastewater was studied for the changes of water quality before and after the technology application from March to May in subtropical climate zone. The changes of  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , total dissolved nitrogen (TDN), total nitrogen (TN), dissolved orthophosphate, total dissolved phosphorus (TDP), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ), turbidity and chlorophyll-a concentrations were monitored periodically, together with the parameters of water temperature, pH and dissolved oxygen (DO). The results showed that the concentrations of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TDN, TDP and dissolved orthophosphate in the pond water were reduced significantly compared with the water from the pond inlet. Although there was an increase of N and P load from the inlet water, the concentrations of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TDN, TDP and

收稿日期: 2014-10-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41471415); 江苏省科技支撑计划项目(BE2013436); 江苏省留学人员科技资助项目(苏人社[2014-323]); 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(14)2093 ]

**作者简介:** 高岩(1978-), 女, 吉林延边人, 博士, 副研究员, 研究方向为富营养化水体生物修复及机理研究。(Tel) 025-84390787; (E-mail) jaas.gaoyan@yahoo.com。张力为共同第一作者。

**通讯作者:** 张振华, (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com; 严少华, (E-mail) shyan@jaas.ac.cn

dissolved orthophosphate in the pond water generally kept a declining trend. The reductions of TN and TP concentrations were less than those of TDN and TDP. The concentration of  $COD_{Mn}$  (-15 mg/L) was high in the pond water before treatment, but gradually declined to 3.0–4.6 mg/L after treatment. In summary the microorganism immobilization technology is applicable for *in-situ* treating domestic wastewaters in early spring within subtropical climate zone.

**Key words:** microorganism immobilization technology; wastewater purification; eutrophication

随着经济的迅速发展、人口的快速增长,中国城市河道、内河及河塘的污染状况日益严重。据统计<sup>[1]</sup>,在流经中国 42 个大中城市的 44 条河流中有 93% 被污染,其中重度污染和中度污染占 79%,64% 的城市河段为Ⅳ类或Ⅴ类水质<sup>[2]</sup>,50% 的重点水源地不符合饮用水标准,水资源的功能及作用正在不断地被弱化,已严重影响到人们正常的生产和生活<sup>[3]</sup>。值得注意的是富营养化是造成此状况的主要原因之一,也是中国城市河塘水体污染的主要特征之一<sup>[3]</sup>。

利用水生植物对氮、磷的吸收作用是目前净化富营养化水体重要手段之一,但是在某些特殊条件下,比如在荒漠化的水生生态条件下,利用水生植物并不是净化水体的最有效方法<sup>[4]</sup>。在水生生态系统中,微生物既参与了有机物分解的过程,也参与了水体的物质循环,能够对水质的改善起到重要的推动作用<sup>[4]</sup>。因此,采样微生物技术,特别是微生物固定化技术净化污水是当前的研究热点之一。其原理是定向培养的菌种附着软性膜载体上,以提高有益菌群的固着繁殖率,尤其是对于以芽孢形式繁衍的菌群,采用膜固定繁殖比浮游生长增殖更快、作用更久。前期的研究表明,该技术可有效去除养殖水体或富营养化水体有机质、氨氮<sup>[4-6]</sup>。然而,目前该技术主要应用于水动力条件稳定的养殖水体<sup>[7]</sup>,在原位净化生活污水方面的研究较为薄弱,特别是在流动水体中,污水不断补充,水流的扰动等都可能影响该技术的应用效果。另外,温度是影响微生物代谢活动及净化污水效果的一个重要因素。在四季变化比较明显的亚热带地区,每年初春温度较低,虽然该时期不是微生物生长的最适宜季节,但大部分微生物能够进行正常的生理代谢活动,然而关于利用微生物固定化技术在非最适温度季节原位净化生活污水的效果鲜有研究。

本试验以容纳生活污水的重污染河塘为研

究对象,在亚热带温度较低的春季(3~5月),采用微生物固定化技术净化污染河塘,定期监测水质变化,研究微生物固定化技术原位净化污染河塘的效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 河塘概况

微生物固定化技术原位净化污染河塘的效果研究在江苏省农业科学院内富营养化污染河塘进行,池塘长 280 m,宽度 35~65 m,全年水位保持在 1.5~2.5 m。该河塘中的污染主要来自上游生活污水及紫金山的雨水冲刷物。河塘兼具景观功能,但富营养化导致夏季藻华频发,水体中有机污染物大量积累,出现发臭现象。

### 1.2 微生物固定化技术

微生物固定化装置及菌剂均由无锡中科活力生物技术有限公司提供。微生物菌剂含有类球红细菌(*Rhodobactersphaeroides*)、多粘类芽孢杆菌(*Paenibacilluspolymyxa*)、枯草芽孢杆菌(*Batillusubtilis*)和植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)等,有效活菌含量 $\geq 5 \times 10^8$  cm<sup>2</sup>,各类单一微生物发酵后培养附着在膜软料上经真空干燥固定为微生物膜,并最终制作成有多个生物载体条组成的笼状挂膜装置(图1)。生物载体是利用晴纶丝和聚丙烯纤维条加工成的长条状载体(宽度为 1 cm,比表面积为 360 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>),在水中可迅速膨胀,具有一定的柔韧性和刚性,使气、水和净化微生物之间充分接触,使净化微生物能均匀地附着在每一根载体条上,从而获得巨大的比表面积。

### 1.3 河塘水质监测采样设计

河塘水质监测于 3 月份开始,从污水进水口至污水出水口沿程共设 5 个采样点(图2),采样点间隔约 70 m,每个采样点采集 3 个重复水样,每周采集水样 1 次,测定水体氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总溶解氮(TDN)、总氮(TN)、可溶性正磷酸盐、总溶解磷(TDP)、总磷(TP)、叶绿

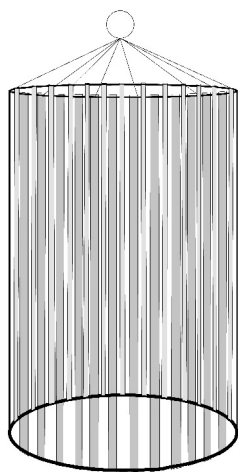


图1 微生物固定化装置示意图

Fig. 1 Sketch map of the facilities carrying the immobilized microorganisms

素 a (Chl. a) 的浓度以及高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 变化规律,同时监测透明度、水温、pH 值以及溶解氧 (DO) 等指标。3 月份测定结果代表微生物固定化技术净化污水之前的水体污染情况背景值。在 4 月初,开始使用微生物固定化技术净化,4 月 8 日,在河塘横向每隔 9 m 挂 10 个微生物膜,均匀分布在一条直线上。采样点设置和监测指标同上,每周采集 2~3 次水样,持续监测至 5 月 15 日。

#### 1.4 水质指标测定方法

水体  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度使用纳氏试剂光度法测定<sup>[8]</sup>,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度使用紫外分光光度法测定<sup>[8]</sup>, 水体 TDN、TN 浓度使用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。水体可溶性正磷酸盐浓度使用钼锑抗光度法测定; 水体 TDP、TP 浓度使用过硫酸钾消解-钼锑抗光度法测定<sup>[8]</sup>。水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  使用酸性法测定; Chl. a 浓度使用丙酮萃取分光光度法测定<sup>[8]</sup>。水体透明度使用塞氏盘法测定<sup>[8]</sup>; 水温、pH 值以及 DO 使用多功能水质测定仪 (YSI Pro Plus, USA) 测定。

#### 1.5 试验数据处理

用 EXCEL 和 SIGMAPLOT 软件统计分析及处理试验数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 污染河塘各种形态氮浓度的变化

采用微生物固定化技术净化前后,河塘水体的

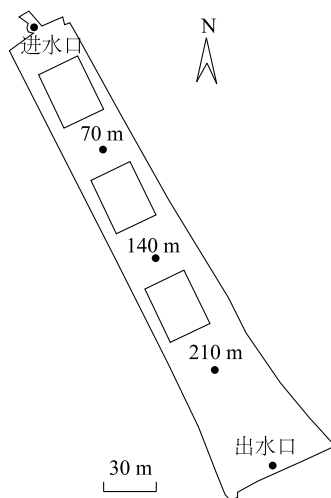


图2 污染河塘水质监测采样点示意图

Fig. 2 Sketch map of the sampling sites in the polluted pond monitoring the water quality

$\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TDN、TN 浓度变化规律见图 3。4 月 8 日挂膜后,河塘水体的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度较进水口明显降低。微生物固定化技术净化加速了河塘水体氮的生物转化过程。微生物通过利用污水中的营养物质如碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 合成其生命结构并摄取生命活动所需要的能量。在这些过程中,可以去除水中的有机污染物、N、P。前期研究结果表明,附着有益微生物的微生物膜对养殖水体、富营养化水体中  $\text{NH}_3\text{-N}$  有良好的净化效果<sup>[9-11]</sup>。有益微生物之间的相互作用对净化水体污染物具有促进效应。如前期研究中利用枯草芽孢杆菌、光合细菌处理养殖废水,发现枯草芽孢杆菌和光合细菌在单独使用时,对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率只有 8.7% 和 16.5%,而在混合使用时对  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率提高到了 20.1%;二者单独使用对 TP 的去除率分别为 51.9% 和 53.8%,混合使用时却降低为 36.1%<sup>[12]</sup>。进水口处污水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度 4 月中旬 (4 月 14 日后) 出现明显上升的趋势,从 4.3 mg/L 上升至 5.0~6.4 mg/L,即河塘的外源  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷升高。即使在该情况下,除 4 月 28 日~5 月 6 日外,水体中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度在氮负荷上升的情况下相较于入水口仍保持着总体下降的趋势。3 月份进水口  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度平均值与出水口处的差值为 -0.14~1.63 mg/L,而 4 月份采用微生物固定化技术后,该差值增大至 1.64~3.70 mg/L,即说明其对净化水体  $\text{NH}_3\text{-N}$  有较为明显的效果。另外,进入 4 月份后温度逐渐升高,河塘水

体中氮的自净生物转化过程加快,河塘污水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  通过硝化过程转化为其他形态的氮,甚至通过耦合的硝化-反硝化过程以气态氮产物( $\text{N}_2$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ )的形式释放到大气中<sup>[13-14]</sup>。

河塘水体 TDN 浓度的变化规律与  $\text{NH}_3\text{-N}$  变化规律相似。进水口处污水 4 月中旬外源 TDN 负荷呈现升高的趋势,但水体中 TDN 浓度相较于入水口保持着稳定的总体下降趋势。3 月份进水口 TDN 和 TN 平均值与出水口处的差值为 1.97 ~ 2.67 mg/L,而 4 月份后该差值增大至 2.39 ~ 6.4 mg/L,

说明微生物固定化技术净化对降低水体 TDN 有较为明显的效果。而由于 4 月下旬温度升高,水体藻类密度有所升高[Chl. a 浓度明显升高(图 6)],藻类密度升高会引起水体有机氮浓度升高<sup>[15]</sup>,使得在后期微生物固定化技术对 TN 的净化效果没有对 TDN 的净化效果明显。采用微生物固定化技术前后河塘水体沿程各采样点  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度与进水口无显著差异,但使用该技术后河塘水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度整体上呈现下降趋势,进水口及河塘水体各采样点仅 4 月 22 日出现  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度的急剧升高。

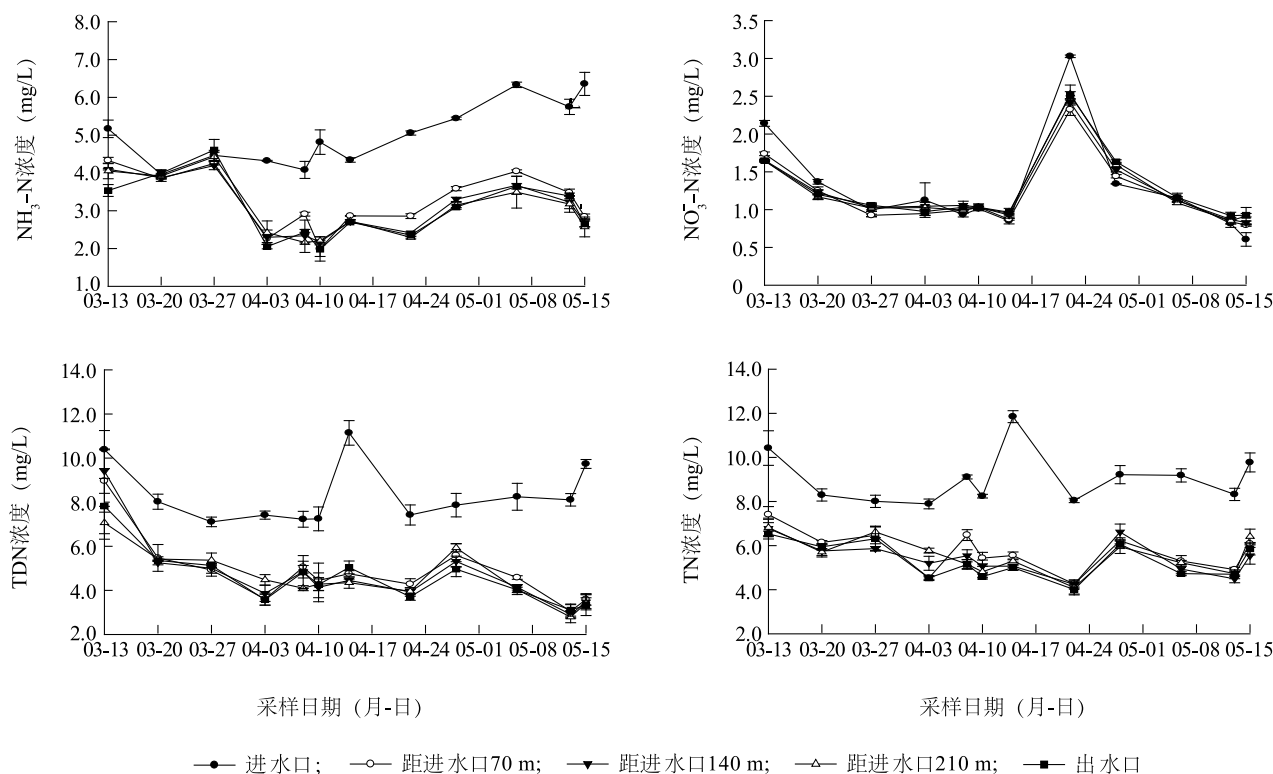


图3 挂膜前后污染河塘水体  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TDN、TN 浓度的变化

Fig. 3 The changes of  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TDN and TN concentrations in the polluted pond before and after using the microorganism immobilization technology

## 2.2 污染河塘水体各种形态磷浓度的变化

采用微生物固定化技术前后河塘水体的可溶性正磷酸盐、TDP、TP 浓度变化规律见图 4。4 月 8 日挂膜后,河塘水体的可溶性正磷酸盐、TDP 浓度较进水口明显降低。3 月份,进水口可溶性正磷酸盐、TDP 浓度平均值与出水口处的差值分别为 0.002 ~ 0.300 mg/L、0.020 ~ 0.320 mg/L;

而采用微生物固定化技术净化后,该差值分别增大至 0.050 ~ 0.380 mg/L、0.120 ~ 0.650 mg/L,说明其对净化水体磷有较为明显的效果。由于生物膜上参与净化反应的微生物种类多,存活世代时间长,对水质、水量变动适应性强,而磷是大部分微生物生长必需元素,因此各类微生物固定化技术净化对污水磷有良好的净化效果<sup>[16-20]</sup>。



与 TN 相似,由于 4 月下旬温度升高,水体的藻类密度有所升高,会引起水体有机磷浓度升高<sup>[21]</sup>,

使得试验后期对 TP 的净化效果没有对 TDP 的净化效果明显。

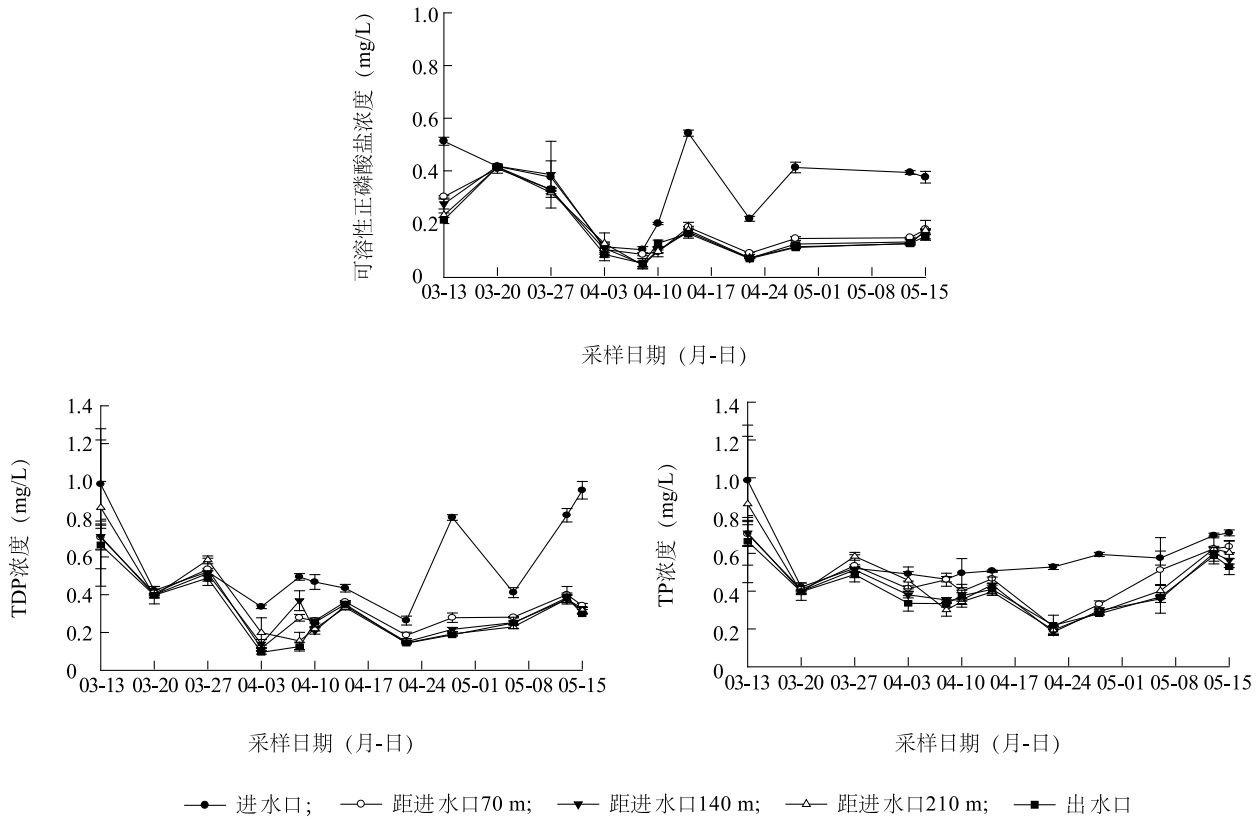


图 4 挂膜前后污染河塘水体可溶性正磷酸盐、TDP、TP 浓度的变化

Fig. 4 The changes of dissolved orthophosphate, TDP and TP concentrations in the water of polluted pond before and after treatment

### 2.3 污染河塘水体高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 的变化

采用微生物固定化技术净化前后,河塘水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的变化规律见图 5。4 月 8 日挂膜后,河塘水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  呈现逐步稳定下降的趋势。3 月底及 4 月初,河塘水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  保持较高的数值 (15.0 mg/L),采用微生物固定化技术净化后  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  稳步下降,后期维持在 3.0 ~ 4.6 mg/L。微生物用于污水处理主要针对污水有害化合物中的有机物质,利用微生物的新陈代谢活动将污水中的有机物分解、转化从而达到净化污水的目的。通常将功能性好、共生性强的多种微生物制作成微生物菌剂,通过适当的配组以及合适的发酵条件制成的活菌制剂,结合

微生物膜的固定作用净化水体,具有经济高效、使用方便等特点。由于目前所应用的环保微生物菌剂中的菌株大都是从污染环境中筛选出来的土著菌株,具有环保性强、安全性高、环境友好等特点,而且以往研究证明它们可以降解多种环境有机物质,在水质净化方面具有较好作用<sup>[22-23]</sup>。有研究结果表明,微生物挂膜技术对降低养殖水体、含酚废水、猪场废水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  具有良好的效果<sup>[24-26]</sup>。光合细菌被广泛认为能显著降低污水中高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ),前人研究结果表明经 7 d 处理,水样高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 的降低幅度可达到 94.6%,光合细菌和枯草芽孢杆菌混合使用可进一步提高去除率<sup>[12]</sup>。

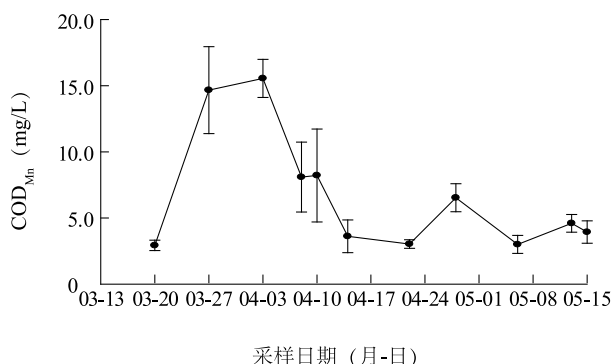


图5 挂膜前后污染河塘水体高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)的变化

Fig. 5 The changes of chemical oxygen demand (COD<sub>Mn</sub>) in the water of polluted pond before and after treatment

## 2.4 污染河塘水体叶绿素 a (Chl. a) 浓度的变化

采用微生物固定化技术前后,河塘水体 Chl. a 浓度的变化规律见图 6。4 月份,水塘 5 个样点水体样品 Chl. a 浓度的平均值呈现持续下降趋势。进入 5 月份后气温上升,Chl. a 浓度呈现明显上升趋势,可能是该阶段也为水稻灌溉蓄水时段,试验水塘频繁放水至下游,水力负荷过大,停留时间过短,影响微生物膜的净化效果。

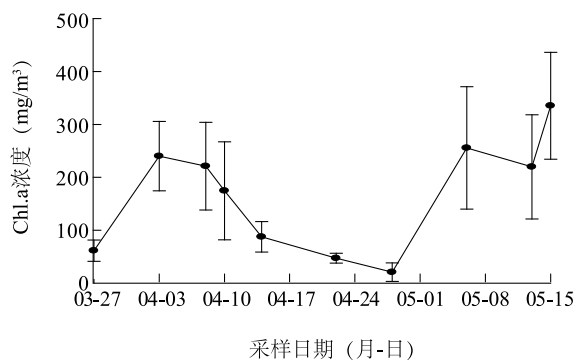


图6 挂膜前后污染河塘水体叶绿素 a (chl. a) 浓度的变化

Fig. 6 The changes of chl. a concentration in the water of polluted pond before and after treatment

## 2.5 污染河塘水体透明度的变化

采用微生物固定化技术前后,河塘水体透明度的变化规律如图 7。4 月 8 日挂膜,6 d 后水体透明度明显升高,由初始的 (33.7±4.7) cm 升高至 (54.1±5.5) cm。14 d 后水体透明度达到 (72.1±4.3) cm。后期透明度逐渐下降,这与河塘水体 Chl.

a 浓度逐渐升高的时间及趋势一致,说明藻类的繁殖降低了水体的透明度。

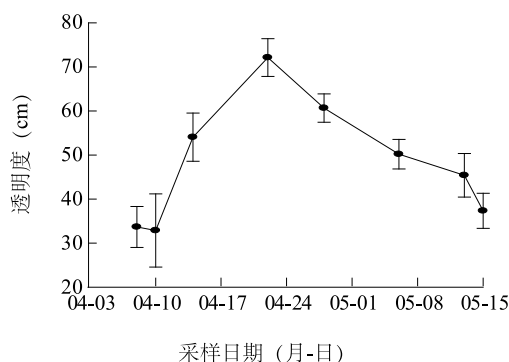


图7 挂膜前后污染河塘水体透明度的变化

Fig. 7 The changes of transparency in the water of polluted pond before and after treatment

## 2.6 污染河塘水体水温、pH 值、溶解氧 (DO) 的变化规律

采用微生物固定化技术前后,河塘水体水温、pH 值、DO 的变化规律见图 8。水质监测期间,水温逐步上升,由 3 月份的 11.5~17.4 °C 上升至 5 月份的 20.0~23.8 °C。水体 pH 值与 DO 的变化趋势相似。水体 pH 主要取决于水体中碳酸化合物 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 之间及其与大气中 CO<sub>2</sub> 的化学平衡<sup>[27]</sup>。在富营养化水体中,由于藻类的光合作用, O<sub>2</sub> 浓度升高, DO 浓度也随之上升,并伴随吸收水中的 CO<sub>2</sub>, 因此水体中 pH 值与 DO 表现为偶联的上升与下降<sup>[28-29]</sup>。

## 3 结论

在温度较低的季节,采用微生物固定化技术净化后,污染河塘水体中 NH<sub>3</sub>-N、TDN、可溶性正磷酸盐、TDP 浓度较进水口处相应各指标的浓度明显降低,在入水口氮、磷负荷上升的情况下,仍保持着总体下降的趋势。微生物固定化技术净化试验后期对 TN、TP 的去除效果没有对 TDN、TDP 的净化效果明显。微生物固定化技术对污染河塘水体 COD<sub>Mn</sub> 的净化效果比较快速、明显,挂膜后水体 COD<sub>Mn</sub> 稳步下降。污染河塘水体 Chl. a 浓度、水体透明度、DO 浓度和 pH 值等随藻类的消长而变化。因此,可以利用微生物固定化技术在温度相对较低的季节原位净化污染河塘。

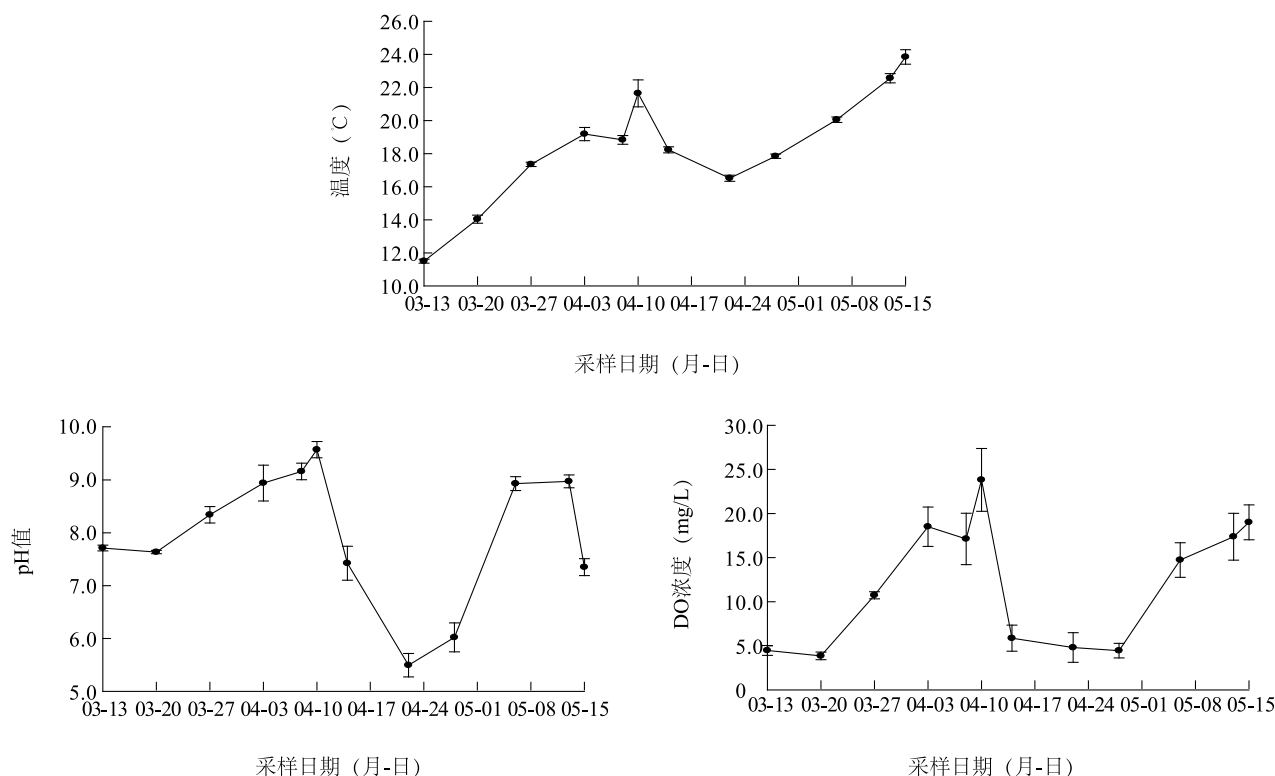


图 8 挂膜前后污染河塘水体温度、pH 值、溶解氧 (DO) 浓度的变化

Fig. 8 The changes of temperature, pH value, and dissolved oxygen (DO) concentration in the water of polluted pond before and after treatment

## 参考文献:

- [1] 许木启, 黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 547-558.
- [2] 许秋瑾, 李欣瑞, 苏东波. 城市中小型湖泊河道生态治理的探讨[J]. 环境保护, 2001(6): 19-20.
- [3] 张美兰. 有机污染河道生物膜原位处理技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 李正魁, 张晓姣, 杨竹攸, 等. 基于固定化氮循环细菌技术的镇江金山湖生态工程效果研究[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 67-72.
- [5] 郭 秒, 慕跃林, 黄遵锡. 复合光合细菌对热带鱼养殖水质净化作用的研究[J]. 水产科学, 2004, 23(2): 30-32.
- [6] 韩士群, 范成新, 严少华. 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.
- [7] 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, 27(4): 1501-1507.
- [8] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] LI X N, SONG H L, LU X W, et al. Characteristics and mechanisms of the hydroponic bio-filter method for purification of eutrophic surface water[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1574-1583.
- [10] 张逸飞, 钟文辉, 王国祥. 微生物在污染环境生物修复中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 198-202.
- [11] 郑焕春, 周 青. 微生物在富营养化水体生物修复中的作用[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 197-202.
- [12] 易 戈, 黎 娅, 容元平, 等. 利用微生物净化鱼塘养殖污水的研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2509-2511.
- [13] 蔡祖聪. 尿素和  $\text{KNO}_3$  对水稻土无机氮转化过程和产物的影响 II.  $\text{N}_2\text{O}$  生成过程[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 414-419.
- [14] GAO Y, YI N, WANG Y, et al. Effect of *Eichhornia crassipes* on production of  $\text{N}_2$  by denitrification in eutrophic water[J]. Ecological Engineering, 2014, 68: 14-24.
- [15] 刘 霞, 杜桂森. 藻类植物与水体富营养化控制[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2002, 23(4): 56-63.
- [16] 李雪梅, 杨中艺, 简曙光, 等. 有效微生物群控制富营养化湖泊蓝藻的效应[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000, 39(1): 81-85.
- [17] 刘智晓, 崔福义, 王树涛, 等. 生物膜工艺实现高效除磷的关键问题及技术路线[J]. 给水排水, 2009, 35(4): 44-49.
- [18] 史旭东. 生物膜技术在脱氮除磷方面的应用研究[J]. 科技情

- 报开发与经济,2008,18(5):132-134.
- [19] 马沛明,况琪军,凌晓欢,等.藻类生物膜技术脱氮除磷效果研究[J].环境科学,2007,28(4):742-746.
- [20] 姜丽丽.生物膜污水处理系统脱氮除磷性能及微生物群落结构研究[D].邯郸:河北工程大学,2012.
- [21] FENG T, SONG C, CHEN J Z. Indication function of aquatic algae for environment[J]. Agricultural Science and Technology, 2012, 13(5): 1060-1066.
- [22] 韩梅,陈锡时,张良,等.光合细菌研究概况及其应用进展[J].沈阳农业大学学报,2003,33(5):387-389.
- [23] CAO Z, SUN L X, CAO X Q, et al. Function of microorganism and efficiency on livestock wastewater treatment by constructed rapid infiltration system[J]. Advanced Materials Research, 2011, 233: 728-732.
- [24] 陈坤,崔友勇,张娅婷,等.光合细菌和水浮莲在河南农村猪场污水中的应用[J].生态与农村环境学报,2009,25(4):103-105.
- [25] 刘和,王晓云,陈英旭.固定化微生物技术处理含酚废水[J].中国给水排水,2003,19(5):53-55.
- [26] SUN D Y, SUNG W P, CHEN R. Research progress of photosynthetic bacteria in wastewater treatment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71: 2831-2835.
- [27] GHANDOUR M F M, KHALIL J B, ATTA S A. Distribution of carbonates, bicarbonates, and pH values in ground water of the Nile delta region, Egypt[J]. Groundwater, 1985, 23(1): 35-41.
- [28] TADESSE I, GREEN F B, PUHAKK J A. Seasonal and diurnal variations of temperature, pH and dissolved oxygen in advanced integrated wastewater pond systems treating tannery effluent[J]. Water Research, 2004, 38: 645-654.
- [29] FRIEDER C A, NAM S H, MARTZ T R, et al. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest[J]. Biogeosciences, 2012, 9: 3917-3930.

(责任编辑:张震林)