

研究简报

## 大型丝状绿藻对 N、P 去除效果研究

况琪军 马沛明 刘国祥 毕永红 胡征宇

(中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

### STUDY ON THE REMOVAL EFFICIENCY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS BY FILAMENTOUS GREEN ALGAE

KUANG Qi Jun, MA Pei Ming, LIU Guo Xiang, BI Yong Hong and HU Zheng Yu

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory for Freshwater Ecology and Biotechnology of China; Wuhan 430072)

关键词: 丝状绿藻; 水网藻; 刚毛藻; 水绵; N、P 去除率

**Key words:** Filamentous green algae; *Hydrodictyon reticulatum*; *Cladophora oligoclona*, *Spirogyra* sp.; Nitrogen; Phosphorus; Removal efficiency

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1009-3207(2004)03-0323-04

当前, N、P 过剩引发水体富营养化现象仍十分严重, 探索有效实用、易于推广的 N、P 去除技术和寻求对 N、P 具有较强吸收和降解能力的生物物种, 始终为环保学者们所关注。利用藻类去除 N、P 的研究始于 20 世纪 50 年代, 迄今已得到广泛应用并取得显著成效<sup>[1]</sup>。为解决早期藻类生物技术中过量单细胞藻类不易收获之不足, 自 20 世纪 90 年代中期, 人们开始尝试利用大型丝状绿藻治理 N、P 污染。陈汉辉<sup>[2]</sup>利用水网藻净化水源水质, 王朝晖等人<sup>[3]</sup>利用水网藻去除富营养化水体中 N、P 营养的研究结果均表明, 大型丝状绿藻能在污水中正常生长代谢, 并对水体中的 N、P 养分具有较高的转化率和去除率。

作者在多次水体调查时发现, 在绿藻门的一些大型丝状或网片状种类, 如水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*)、刚毛藻 (*Cladophora oligoclona*)、水绵 (*Spirogyra* sp.) 和鞘藻 (*Oedogonium* sp.) 等旺盛生长的水域, 水体感观良好, 水色较清澈, 鱼群穿梭, 水质营养水平低, pH 值 7.5 左右, TN、TP、TSS 等水质指标均达 III 类地表水标准。无疑, 大型丝状绿藻对水质的保护起到了特有作用。本文试图通过比较水网藻、刚毛藻和水绵对合成生活污水中 N 和 P 的去除效果, 为筛选合适的、净化能力强的藻种, 拓宽大型丝状绿藻在富营养化湖泊水质改善和生态修复中的应用提供参考依据。

#### 1 材料和方法

**1.1 试验装置和培养条件** 试验装置主要由供料容器和藻类培养系统组成, 容量 25L。4 支 20W 日光灯管分别置藻类培养系统的上部 24h 提供光照, 光强 3000lx 左右, 用 JD-1A 型照度计 (上海产) 直接测定; 温度波动在 13—18℃ 之间。

**1.2 试验藻种及培养** 用于试验的大型丝状绿藻分别为水网藻、刚毛藻和水绵, 均采自天然水体。藻种采回后, 随即用自来水洗净附着在藻体上的其他微型生物、滤干水分、称重, 各按 40g/L 鲜重的量接种到经修改的 BBM 培养基中, 置上述条件下驯化培养 3d, 随后逐渐注入人工合成污水, 流速 25L/d; 待藻类培养系统的培养基被人工合成污水完全交换并平衡 2d 后, 开始收集数据, 隔天取样分析一次。

**1.3 测定项目及分析方法** 试验期间, 主要记录反应系统中的 pH、水温及溶氧, 定时测定藻类反应系统进、出水中 TN、TP、PO<sub>4</sub>-P 的 NH<sub>4</sub>-N 的含量; 同步取样, 按水与废水分析的标准方法<sup>[4]</sup>进行。试验先后进行 2 批, 每批持续 2 周, 取平均值进行结果分析。

**1.4 合成污水组分与特征** 由于天然污水中不确定因素太多, 不利于试验结果的直接比较, 故而试验用污水系人工配制的合成污水, 其组分为 (g): 尿素 0.15, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.075,

收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-05-26

基金项目: 863 计划 (2002AA601021); 973 计划 (2002CB412309) 资助

作者简介: 况琪军 (1952—), 女, 湖南攸县人; 高工; 主要从事污水生物净化与藻类生态毒理学研究。工作中得到课题组徐敏, 陈珊, 邓中洋, 李运广, 赵先富, 韩丹翔和梅洪等同志的大力协助, 特此致谢

通讯作者: 胡征宇 (1957—); 研究员, 博导; 主要从事藻类分类、资源利用与生物多样性研究

Ca(HPO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 0.03, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.025, NaHCO<sub>3</sub> 0.30, FeCl<sub>3</sub> (1%) 0.15mL, 自来水 1000mL; 特征为 (mg/L): TN25—30, NH<sub>4</sub>-N 15—20, TP 5—7, Mg 2—5, Ca 2.0; pH 7.4—7.7。

2 结果与讨论

2.1 培养系统 pH 值、DO 及藻类生长状况

为确保藻类对污水处理的效果, 控制适宜的理化条件和维持藻类的正常生长代谢极为重要。本研究期间, 藻类反应系统的 pH 值波动在 8 左右, DO 基本控制在 7—10mg/L 之间, 最高值出现在第一周。

对藻类生长的定性观察显示, 三种大型丝状绿藻在修改的 BBM 培养基中能快速生长, 当将其转入人工合成污水后, 亦能保持正常生长代谢, 尤其是在转接后的头一周, 藻体色泽鲜绿、自然伸展, 新生藻丝清晰可见。当处理到第 11d 时, 培养系统的 DO 和藻细胞代谢的旺盛程度开始下降和减弱, 藻体色泽逐渐变浅, 并伴有白色非沉淀絮状物形成, 对 N、P 的去除率明显下降, 可能因培养系统中细菌和其他微生物随培养时间的延长而大量增殖所致。此外, 试验中各进水的 TN 和 NH<sub>4</sub>-N 的浓度均低于特征值, 可能因以下因素所致: 理论计算值与实际称量之间存在差异, 供水装置的吸附和光

解作用, 水体中微生物的降解作用, 以及稀释过程中的人为误差等。

2.2 水网藻对 N、P 营养的去除效果

表 1 和图 1 分别展示了水网藻反应系统进、出水中 N、P 的浓度变化及其去除百分率。数据显示, 在本试验条件下, 水网藻对 TP、PO<sub>4</sub>-P、TN 和 NH<sub>4</sub>-N 的去除率分别波动在 37.03—55.75%, 31.81—50.44%, 33.58—59.23% 和 41.44—69.28% 之间, 在培养的第 10d 之前, 去除率随培养时间的延长逐渐增高, 随后趋于平缓或有所下降。两周试验期间, 水网藻对 TP、PO<sub>4</sub>-P、TN 和 NH<sub>4</sub>-N 的平均去除率分别为 45.82%, 40.52%, 49.08% 和 57.37%, 日均减少量分别为 3.72mg/L, 1.64mg/L, 6.17mg/L 和 0.72mg/L, 相比之下, 对 NH<sub>4</sub>-N 的去除率略高一些, 与林秋奇等人<sup>[5]</sup>报道的, 水网藻在 N、P 比为 15 的条件下, 优先吸收 NH<sub>4</sub>-N 的结果基本一致。王朝晖等人<sup>[3]</sup>在水网藻处理富营养化及重富营养化湖水的研究中纪录到, 经 2d, 4d, 6d 的处理后, 水网藻对 TN 和 TP 的去除率均达 70% 以上。而本研究中, 水网藻对 TN 和 TP 的去除率均不足 50%, 分析认为, 可能与室内和室外的实验条件存在明显差异、天然湖水和人工配水中营养要素的原始浓度和型态不同有关。

表 1 水网藻处理系统进 (In)、出水(Out) 中氮、磷浓度变化及藻类降解量 (mg/L)  
Tab. 1 Changes of N and P in the inflow and outflow of *H. reticulatum* treatment system

处理时间 Treatment time (d)	TP			PO <sub>4</sub> -P			TN			NH <sub>4</sub> -N		
	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO
20 <sup>d</sup>	6.94	4.37	2.57	3.90	2.58	1.32	12.50	8.30	4.20	1.01	0.56	0.45
04 <sup>h</sup>	7.12	4.21	2.91	3.76	2.35	1.41	11.60	6.79	4.81	1.07	0.49	0.58
06 <sup>h</sup>	7.63	4.09	3.54	3.52	2.14	1.38	11.44	5.88	5.56	1.01	0.42	0.59
08 <sup>h</sup>	8.19	4.32	3.87	4.02	2.18	1.84	13.58	6.36	7.22	1.18	0.44	0.74
10 <sup>h</sup>	8.33	3.81	4.52	4.14	2.15	2.19	12.27	5.17	7.11	1.31	0.43	0.92
12 <sup>h</sup>	8.42	3.73	4.69	4.35	2.16	1.99	12.31	5.02	7.29	1.33	0.41	0.89
14 <sup>h</sup>	8.31	4.37	3.94	3.56	2.22	1.34	12.35	5.36	7.00	1.45	0.56	0.88
Mean	value	3.72±0.7234		1.64±0.3334			6.17±1.1971			0.72±0.1708		

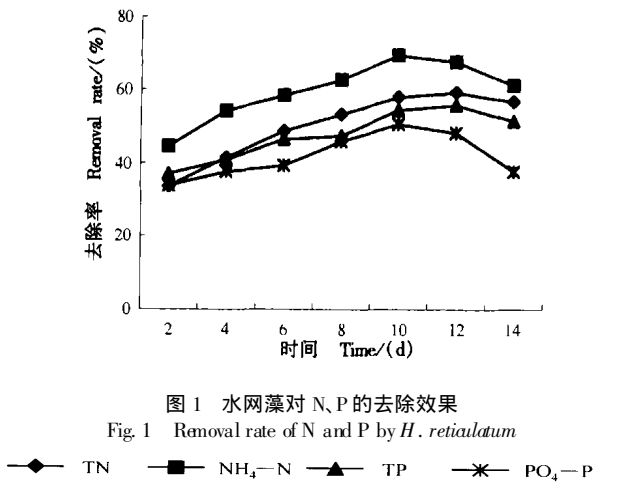


图 1 水网藻对 N、P 的去除效果  
Fig. 1 Removal rate of N and P by *H. reticulatum*

◆ TN    ■ NH<sub>4</sub>-N    ▲ TP    \* PO<sub>4</sub>-P

2.3 刚毛藻对 N、P 的去除效果

刚毛藻系统进出水中 N、P 浓度变化及去除效果详见表 2 和图 2, 数据表明, 在本试验条件下, 刚毛藻对污水中 P 的去除效果极为显著, TP 的去除率稳定在 50%—60% 之间, 日均减少量 4.94mg/L; PO<sub>4</sub>-P 的去除率始终保持在 40% 以上, 最高去除率 57.14%, 最高日减少量 3.78mg/L。相比之下, 刚毛藻对 N 的处理效果明显差些, 平均去除率 TN 不足 40%, NH<sub>4</sub>-N 不足 30%, 日均减少量分别为 4.8mg/L 和 0.32mg/L, 说明不同藻类对营养的吸收利用具有选择性。由图 2 曲线可见, 刚毛藻对 TP、PO<sub>4</sub>-P 和 NH<sub>4</sub>-N 的去除效果基本上随处理时间的延长稳中有升; 但对 TN 的去除率则起伏较大, 估计与人为操作失误有关。陈汉辉等人<sup>[6]</sup>的研究结果证明, 在天然条件下的中型规模的试验中, 刚毛藻的生长速率, 对 NH<sub>4</sub>-N 和 COD 的去除能力均与水网藻的不相上下, 但在实验室条件下, 则均低于水网藻, 可见, 环境条件的改变对藻类的处理效果有一定影响。Katsuya 等人<sup>[7]</sup>利用气生桔

色藻(*Trentepohlia aurea*)净化 N、P 废水的研究结果同样证明了这一点, 他们发现, 当培养基中含高浓度  $\text{NH}_4\text{—N}$ 、 $\text{NO}_3\text{—N}$  和  $\text{PO}_4\text{—P}$  时, 30d 的处理期间, 桔色藻对  $\text{NO}_2\text{—N}$ 、 $\text{NO}_3\text{—N}$  的去除率分别为 37% 和 32%, 对  $\text{NH}_4\text{—N}$  和  $\text{PO}_4\text{—P}$  的去除率仅为 5% 和 12%; 而当系统中的  $\text{NO}_3\text{—N}$  缺乏时, 桔色藻对  $\text{NH}_4\text{—N}$  和  $\text{PO}_4\text{—P}$  的去除率分别升至 80% 和 35%。差异极大。

表2 刚毛藻处理系统进(In)、出水(Out)中氮、磷浓度变化及藻类利用量(mg/L)  
Tab. 2 Changes of N and P in the inflow and outflow of *C. oligodona* treatment system

处理时间 Treatment time (d)	TP			PO <sub>4</sub> —P			TN			NH <sub>4</sub> —N		
	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO
02 <sup>nd</sup>	8.58	4.27	4.31	6.05	3.58	2.67	10.24	7.07	3.16	1.11	0.86	0.25
04 <sup>th</sup>	8.43	3.86	4.57	7.07	3.93	3.13	12.48	8.15	4.32	1.17	0.87	0.31
06 <sup>th</sup>	8.69	3.88	4.81	7.02	3.62	3.39	10.96	6.68	4.28	1.05	0.76	0.29
08 <sup>th</sup>	9.04	3.96	5.09	6.92	3.49	3.43	11.94	6.25	5.90	1.28	0.87	0.40
10 <sup>th</sup>	8.76	3.62	5.14	6.96	3.18	3.79	11.79	5.75	6.04	1.08	0.72	0.37
12 <sup>th</sup>	9.88	3.93	5.92	8.81	3.78	5.03	12.61	7.45	5.17	1.18	0.85	0.33
14 <sup>th</sup>	8.67	3.95	4.72	6.75	3.48	3.27	11.73	7.03	4.71	1.10	0.79	0.30
Mean value		4.94±0.4843			3.53±0.6881			4.80±0.9322			0.32±0.0467	

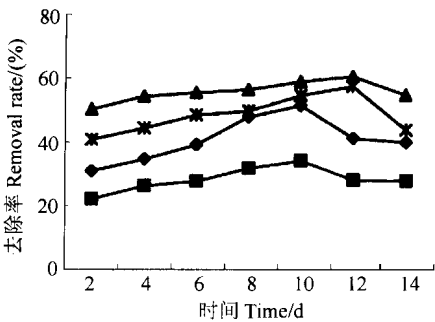


图2 刚毛藻对 N、P 的去除效果  
Fig. 2 Removal rate of N and P by *C. oligoclona*

◆ TN    ■ NH<sub>4</sub>—N    ▲ TP    \* PO<sub>4</sub>—P

2.4 水绵对 N、P 营养的去除效果

表 3 和图 3 分别列举了水绵系统进、出水中 N、P 营养的

浓度变化及其去除率。由表中数据可见, 水绵对 TP 和  $\text{PO}_4\text{—P}$  的去除率分别波动在 40%—60% 和 30%—55% 之间, 平均去除率 47.6% 和 42.84%, 日均减少量分别为 3.07mg/L 和 1.14mg/L。水绵对 TN 的去除特征与 TP 的情形极为类似, 两条曲线基本重合, 至第 4 次取样, 去除率稳定在 50% 以上。2 周试验期间, 水绵对 TN 的平均去除率为 47.01%, 日均减少量 5.64mg/L。相比之下, 水绵对  $\text{NH}_4\text{—N}$  的去除效果更好一些, 亦比较稳定, 去除率始终保持在 50% 以上, 最高去除率 72%, 最高日减少量 1.19mg/L。由图 3 曲线可见, 水绵对  $\text{NH}_4\text{—N}$  的去除率随培养时间的延长略呈下降趋势, 这可能因水绵在生长代谢过程中优先吸收  $\text{NH}_4\text{—N}$ , 且在吸收到一定的量以后, 吸收速率趋于平缓所致<sup>[6]</sup>。值得说明的是, 利用水绵处理 N、P 的试验中, 在第 12d 取样后, 藻类反应系统的水色开始变绿, 次日症状明显加重, 同时伴有藻腥味, 去除率急剧下降。镜检结果显示, 藻体衰老, 细胞内含物和色素体与正常细胞差异明显, 部分藻丝死亡。

表3 水绵处理系统进(In)、出水(Out)中氮、磷浓度变化及藻类利用量(mg/L)  
Tab. 3 Changes of N and P in the inflow and outflow of *Spirogyra* sp treatment systemsp

处理时间 Treatment time (d)	TP			PO <sub>4</sub> —P			TN			NH <sub>4</sub> —N		
	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO	In	Out	FO
02 <sup>nd</sup>	5.82	3.46	2.36	2.74	1.93	0.81	12.47	7.58	4.89			
04 <sup>th</sup>	6.47	3.54	2.93	2.83	1.82	1.01	11.96	6.64	5.32	1.08	0.30	0.78
06 <sup>th</sup>	6.27	3.35	2.92	2.27	1.39	0.88	9.76	5.14	4.62	1.23	0.35	0.88
08 <sup>th</sup>	6.31	3.28	3.03	2.35	1.26	1.09	13.36	6.32	7.04	1.67	0.48	1.19
10 <sup>th</sup>	6.70	2.95	3.75	2.42	1.21	1.21	12.10	5.74	6.36	1.12	0.39	0.73
12 <sup>th</sup>	6.54	2.67	3.87	2.93	1.31	1.62	11.95	5.53	6.42	1.21	0.43	0.78
14 <sup>th</sup>	6.94	4.33	2.61	3.01	1.68	1.33	12.45	7.59	4.86	1.79	0.85	0.94
Mean value		3.07±0.5157			1.14±0.2583			5.64±0.8783			0.88±0.1539	

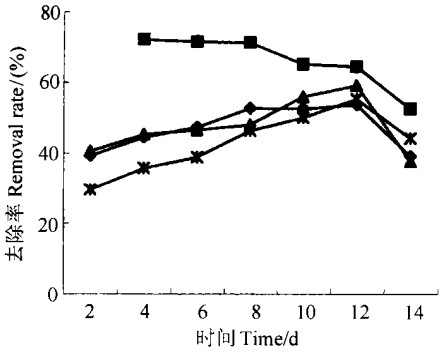


图3 水绵对 N、P 的去除效果

Fig. 3 Removal rate of N and P by *Spirogyra* sp.

◆ TN    ■ NH<sub>4</sub>-N    ▲ TP    ✱ PO<sub>4</sub>-P

以上结果显示,三种大型丝状绿藻在人工合成污水中能正常生长繁殖,并对水体中的 N、P 营养具有较强的去除能力。三者相比,水绵对 NH<sub>4</sub>-N 的去除效率最高,水网藻次之,刚毛藻只及前两者的一半左右;其余三项指标,三者的去除效果仅存在轻微差异,其中刚毛藻对 TP 和 PO<sub>4</sub>-P 的去除效果更好一些,水网藻和水绵则对 NH<sub>4</sub>-N 的处理效果较好。由于水绵在细胞衰老和死亡后常产生藻腥味,会对水体造成二次污染,而水网藻和刚毛藻则未观察到此现象,因此认为,三种大型丝状绿藻中,水网藻和刚毛藻可推荐为改善富营养化水体水质的生态工程用藻。

与早期成熟的藻菌氧化塘、高效藻类塘、活性藻和固定化细胞等藻类污水处理技术<sup>[8,9]</sup>相比,利用大型丝状绿藻净化污水,首先在易于收获过量藻类细胞上占据优势,其次因不需要曝气装置而在程序上更为简便、管理费用上明显降低,不失为一种廉价的污水处理手段,极具应用前景。

参考文献:

[ 1 ] Kuang Q J, Xia Y C, Wu Z B. Study on the algae in a synthetic biological pond[ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994. **18**( 2 ): 97—106.

[ 况琪军,夏宜<sup>1</sup>,吴振斌.综合生物塘中的藻类研究.水生生物学报,1994. **18**(2) : 97—106]

[ 2 ] Chen HH. Preliminary study on purification of source water with *Hydrodictyon* [ J ]. *Chongqing. Environmental Science*. 1998. **20**(4) : 19—21. [ 陈汉辉.水网藻净化水源水的初步研究.重庆环境科学.1998. **20**(4) : 19—21]

[ 3 ] Wang ZH, Jiang T J. Study on the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated waters by *Hydrodictyon reticulatum* [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 1999. **19**(4) : 448—452. [ 王朝晖,江天久.水网藻对富营养化水体中 N 和 P 的去除研究.环境科学学报.1999. **19**(4) : 448—452]

[ 4 ] Chinese Environmental Protection Agency. Analysis methods for the examination of water and wastewater. 3rd Edition[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Publisher. 1998. 252—286. [ 国家环保局.水和废水检测分析方法(第三版).北京:中国环境科学出版社.1998.252—286]

[ 5 ] Lin Q J, Wang Z H, Study on the treatment of water eutrophication by *Hydrodictyon reticulatum* [ J ]. *Acta Ecology*. 2001. **21**( 5 ): 814—819. [ 林秋奇,王朝晖.水网藻处理富营养化水体的研究.生态学报.2001. **21**(5) : 814) 819]

[ 6 ] Chen HH. Purification ability of *Hydrodictyon* for source water in winter [ J ]. *Shanghai Environmental Science*. 1999. **1**: 18) 20, 23. [ 陈汉辉.冬季水网藻对水源水的净化能力.上海环境科学.1999. **1**: 18) 20, 23]

[ 7 ] Katsuya A, Atsue I, Morio H. Removal of nitrate, nitrite ammonium and phosphate ions from water by the aerial microalga *Trentepohlia aurea* [ J ]. *Journal of Applied phycology*, 2002, **14**: 129) 134

[ 8 ] Kuang Q J, Xia Y C, Hui Y. Microbial hydrobiology and wastewater treatment [ J ]. *Urban Environment*. 2002. **6**: 10) 13. [ 况琪军,夏宜<sup>1</sup>,惠阳.微型生物技术与污水处理.城市环境,2002. **6**: 10) 13]

[ 9 ] Kuang Q J, Tan Y Y. Study on the removal of nitrogen, phosphorus and organics by activated algae system [ J ]. *China Environmental Science*. 2001. **21**(3) : 212) 216. [ 况琪军,谭渝云.活性藻系统对 N、P 及有机物的去除研究.中国环境科学.2001. **21**(3) : 212) 216]