

# 初始密度及饥饿对栅藻 LX1 氮磷去除的影响

汤会军<sup>1</sup>, 李 鑫<sup>2</sup>, 胡洪营<sup>2</sup>, 甘 柯<sup>1</sup>, 关东明<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083;

2. 清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

**摘 要:**研究了初始密度、饥饿处理对栅藻 LX1 (*Scenedesmus* sp. LX1) 氮磷去除的影响, 以探索微藻去除氮磷的强化手段。在本研究范围以内 ( $0.125 \times 10^6 \sim 12.5 \times 10^6$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ ) 初始密度为  $12.5 \times 10^6$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  的栅藻 LX1 对氮磷的去除效果最好, 培养 3 d 后对 TN、TP 的去除率分别达到了 74.7% 和 100%, 去除速率分别为  $3.73, 0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。饥饿处理 3 d 的栅藻 LX1 生长良好, 培养 5 d 后对 TN、TP 的去除率分别达到了 51.3%、82.2%, 去除速率分别为  $1.54, 0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 分别比对照增加了 24.4% 和 60.2%。高初始密度和饥饿处理有利于提高栅藻 LX1 对氮磷的去除效果。

**关键词:** 栅藻; 氮磷去除; 初始密度; 饥饿处理

**中图分类号:** X703.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3770(2010)07-0033-003

水体富营养化治理是目前环境保护领域中的热点和难点, 其根本措施是控制氮磷向水体中的排放。目前污水处理厂采用较广泛的脱氮除磷工艺有厌氧-缺氧-好氧法(A<sup>2</sup>/O)、序批式活性污泥法(SBR)和氧化沟等, 这些常规生物处理工艺对氮磷去除效果有限, 同时存在基建投资大、运行费用高、能量浪费等问题<sup>[1]</sup>。

微藻是一类个体微小、介于微生物和植物之间、能进行放氧光合作用的藻类类群, 约占全球已知 3 万余种藻类的 70%<sup>[2]</sup>。与其它藻类相比, 微藻富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、各种氨基酸、维生素、抗生素、高不饱和脂肪酸以及其它多种生物活性物质, 在保健食品、医药、饲料、生物燃油等领域具有很好的开发前景。自 Oswald 和 Gotaas 于 20 世纪 50 年代最早提出利用微藻处理污水以来, 大量研究证明了利用微藻去除污水中氮磷的潜力和可行性<sup>[3-6]</sup>。微藻可通过光合作用吸收污水中的硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、磷酸盐等无机盐的氮磷合成氨基酸、蛋白质、磷脂等有机物, 形成微藻细胞, 因此可降低水体中的氮磷含量。利用微藻处理污水具有以下优点: 运行成本低, 可获得微藻资源并避免污泥处理的问题, 不会引起二次污染; 高效去除氮磷的同时固定 CO<sub>2</sub>、产生 DO、去除重金属等<sup>[7-9]</sup>。被广泛应用于污水处理的微藻有栅藻、小球藻和螺旋藻<sup>[7]</sup>。

微藻对氮磷的去除效果受到很多因素的影响, 本文研究了在人工模拟二级出水中初始密度、饥饿处理对栅藻 LX1 (*Scenedesmus* sp. LX1) 氮磷去除的影响, 以探索微藻去除氮磷的强化手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 材 料

研究用的栅藻 LX1 藻种由清华大学环境科学与工程系分离获得。藻种保存于稀释 50% 的 BG11 培养基中。

人工模拟二级出水(简称二级出水)中 TN 和 TP 的质量浓度分别为 15、2.0 mg  $\cdot \text{L}^{-1}$ , 各组分及含量

表 1 二级出水分组及含量

Tab.1 The components and contents of secondary effluent

组分	$\rho/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	组分	$\rho/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
NaNO <sub>3</sub>	60.7	柠檬酸	3.0
NH <sub>4</sub> Cl	38.2	柠檬酸铁铵	3.0
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	14.7	EDTA	0.5
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	37.5	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	18.0	A <sub>5</sub> +Co 溶液	1.0

表 2 A<sub>5</sub>+Co 溶液组分及含量

Tab.2 The components and contents of A<sub>5</sub>+Co solution

组分	$\rho/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	组分	$\rho/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.079
MnCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	1.81	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.390
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.222	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.049

收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50825801)

作者简介: 汤会军(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境生物技术, 联系电话: 13811889489, E-mail: tanghuijun111@126.com

联系作者: 胡洪营 教授, E-mail: hhyhu@tsinghua.edu.cn

见表1,其中 $A_5+Co$ 溶液的各组分及含量见表2。

## 1.2 试验与分析方法

### 1.2.1 藻细胞培养

向250 mL锥形瓶中加入100 mL二级出水,高温高压灭菌(121 °C, 30 min)。取1 mL藻种液离心10 min(10 000  $r \cdot \min^{-1}$ , 4 °C),弃去上清液,将藻细胞沉淀用3 mL质量浓度为15  $mg \cdot L^{-1}$ 的 $NaHCO_3$ 溶液清洗2遍后,悬浮于1.0 mL  $NaHCO_3$ 溶液,将藻细胞悬浊液接种至二级出水中,放入人工气候箱培养。培养条件:光照强度约1300 lx,光暗比14:10,温度25 °C。每组试验做3个平行样。

### 1.2.2 初始密度对氮磷去除的影响

设置栅藻LX1的初始密度分别为 $0.125 \times 10^6$ 、 $1.25 \times 10^6$ 、 $6.25 \times 10^6$ 、 $12.5 \times 10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$ ,培养3 d后比较栅藻LX1对TN、TP的去除效果。

### 1.2.3 饥饿处理的影响

取2 mL栅藻LX1藻种液经1.2.1节中的藻细胞清洗后,悬浮于2 mL的 $NaHCO_3$ 溶液,置于人工气候箱中饥饿处理3 d;另取2 mL藻种液直接置于人工气候箱中培养3 d。3 d后将2组栅藻LX1藻液分别接种至二级出水中,比较2组栅藻LX1的生长情况和对TN、TP的去除效果。

### 1.2.4 藻细胞计数

测定藻液在650 nm处的吸光度 $A_{650}$ ,根据前期研究结果,藻细胞密度 $D$ 与 $A_{650}$ 的关系为:

$$D = 9.52 \times 10^6 A_{650} + 70\,957 (R^2 = 0.997). \quad (1)$$

### 1.2.5 水质测定

将藻液离心10 min(10  $kr \cdot \min^{-1}$ , 4 °C),用0.45  $\mu m$ 滤膜过滤上清液,测定TN和TP含量。TN和TP测定均采用国家环境保护总局颁布的标准方法,分别为过硫酸钾氧化紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 初始密度对氮磷去除的影响

不同初始密度下栅藻LX1培养3 d后对TN、TP的去除情况如表3所示。

表3 不同初始密度下培养3 d后栅藻LX1对TN、TP的去除  
Tab.3 TN and TP removal efficiencies of *Scenedesmus* sp. LX1 with different initial cell densities and a culture period of 3 d

初始密度 / $10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$	3 d后 $\rho /$ $mg \cdot L^{-1}$		去除速率 / $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$		去除率 / %	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
0.125	13.35	1.050	0.55	0.317	11.0	47.5
1.25	8.99	0.022	2.00	0.659	40.1	98.9
6.50	6.11	0.022	2.96	0.659	59.3	98.9
12.5	3.80	0.000	3.73	0.667	74.7	100

由表3可见,初始密度为 $0.125 \times 10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 的栅藻LX1对TP的去除速率和去除率最小,分别为 $0.317 \cdot mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$ 和47.5%,其他3种不同初始密度下的栅藻LX1对TP的去除速率和去除率基本相同。

栅藻LX1对TN的去除速率和去除率随初始密度的增大而增大。根据不同初始密度的栅藻LX1对TN的去除速率做统计分析,建立回归方程,结果如式(2)所示:

$$d\rho_t/dt = 0.66 \ln D - 7.29 (R^2 = 0.99). \quad (2)$$

式中 $\rho_t$ 为 $t$ 时刻TN的质量浓度( $mg \cdot L^{-1}$ ), $t$ 为培养时间(d), $d\rho_t/dt$ 为TN的去除速率( $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$ )。

式(2)表示了栅藻LX1对TN去除速率随初始密度变化的规律,可用于根据栅藻LX1初始密度对TN去除速率的预测。

初始密度的大小直接影响微藻生长和对氮磷的去除效果。初始密度过小,会使微藻前期生长缓慢,生长周期延长,氮磷的去除效果差。较大的初始密度利于微藻适应新环境,使产物合成加快,氮磷去除效果好,但初始密度过大,会使微藻生长过快,缺乏营养物质, $CO_2$ 供应不足,存在藻细胞相互遮光现象,积累抑制物,降低光合作用效率<sup>[11-12]</sup>。

本研究条件下,初始密度越大,栅藻LX1对TN、TP的去除率和去除速率也越高。初始密度为 $12.5 \times 10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 时,处理效果最好。这与Lau等人的研究结果相似,他们分别以 $10 \times 10^6$ 、 $5.0 \times 10^6$ 、 $1.0 \times 10^6$ 、 $0.50 \times 10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 4种初始密度的普通小球藻处理初次沉淀的污水,1周之内初始密度最大的 $10 \times 10^6$ 个 $\cdot mL^{-1}$ 的小球藻对 $NH_4^+-N$ 、总凯氏氮(TKN)、总有机氮(TON)、TP的去除效果最令人满意<sup>[12]</sup>。

### 2.2 饥饿处理对氮磷去除的影响

饥饿处理和对照组栅藻LX1的生长情况如图1所示。在初始密度基本相同的条件下,恢复培养的第1天2组的藻密度差异不大,但从第1天到第4天饥

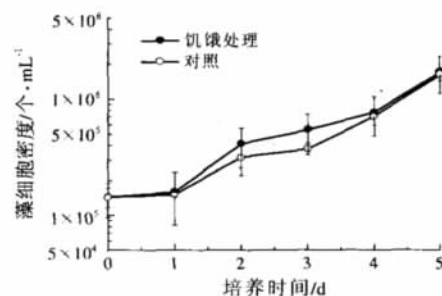


图1 饥饿处理和对照栅藻LX1培养5 d的藻密度变化曲线  
Fig1 Curves of the cell density changes of *Scenedesmus* sp. LX1 with starvation treatment and a culture period of 5 d

饿处理的藻密度略高于对照组,第4天到第5天2组藻密度差异缩小,在第5天2组藻密度基本相同。

培养5d后饥饿处理和对照组栅藻 LX1 对 TN、TP 的去除率、去除速率分别如表4所示。

表4 饥饿处理和对照的栅藻 LX1 培养5d后对 TN、TP 的去除率、去除速率

Fig.4 TN and TP removal efficiencies and rates of *Scenedesmus* sp. LX1 with starvation treatment and a culture period of 5 d

试验组	去除率/%		去除速率/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	
	TN	TP	TN	TP
对照	43.9	54.6	1.32	0.22
饥饿处理	51.3	82.2	1.54	0.33

由表4可见,经饥饿处理的栅藻 LX1 对 TN、TP 的去除率、去除速率明显高于对照组,对 TN、TP 的去除速率分别比对照组增加了24.4%和60.2%。

郭羽丰等发现四列藻继氮磷营养盐胁迫处理后平均相对生长率、细胞数、叶绿素a含量和生物量均增高,而在恢复生长阶段的对数生长期末,处理组与对照组的细胞密度趋于接近<sup>[13]</sup>。这与本研究中饥饿处理的结果相似。

经过饥饿处理的栅藻 LX1 被剥夺了氮磷营养盐,导致解除营养盐胁迫后对氮磷的过量吸收,这可用生物中的超补偿现象来解释<sup>[14]</sup>。微藻在遭受营养限制后,生长以及生理机制会受到制约和影响,但在恢复到适宜的生存条件后,其在生长和对营养盐的吸收方面,会超过未受过胁迫的微藻。到生长后期饥饿处理的栅藻 LX1 的藻密度与对照组差异逐渐缩小,这说明饥饿处理对藻细胞的生长不会造成长期的影响,随着培养时间的推移,藻细胞的生长会逐渐恢复到正常的水平,这可能与环境资源总量的限制有关,也可能与不同补偿生长效应持续的时间有关<sup>[15]</sup>。

但是对微藻的饥饿处理的时间不应过长。Juan-Pablo Hernandez 等报道小球藻经过3d的饥饿处理后可在一定程度上恢复生长并过量吸收磷营养盐,而经过5d饥饿处理的小球藻藻细胞数目却不断下降,说明5d的饥饿处理对小球藻的生长产生了不可恢复的负面影响<sup>[16]</sup>。产生这一现象的原因可能是过长时间的营养缺乏会导致藻细胞的结构退化,抑制微藻的恢复生长。

3 结 论

初始密度对栅藻 LX1 氮磷去除有显著的影响,在本研究范围内,初始密度越大,氮磷的去除效果越好。本研究中初始密度为 $12.5\times10^6$ 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 时栅藻 LX1 对 TN、TP 的去除效果最好,分别达到了74.7%和

100%,去除速率分别为3.73和 $0.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

适当的饥饿处理可促进栅藻 LX1 的生长,明显提高栅藻 LX1 对氮磷的去除率和去除速率。饥饿处理3d的栅藻 LX1 恢复培养5d后对 TN、TP 的去除率分别达到了51.3%和82.2%,去除速率分别为1.54和 $0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,分别比对照组增加了24.4%和60.2%

参考文献:

[1] 谢林伸,周凌,王银爽. 污水脱氮除磷新工艺研究进展[J].江苏环境科技,2007,20(z1):33-35.

[2] 张志斌. 微藻光自培养中光传递及其生长动力学研究[D].南昌:江西师范大学,2008.

[3] Oswald W J, Gotaas H G, Golueke C G, et al. Algae in waste treatment[J].Sewage Ind Wastes,1957,29:437-457.

[4] N F Y Tam, Y S Wong. Wastewater nutrient removal by *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus* sp. [J].Environmental Pollution, 1989,58(1):19-34.

[5] Luz E de-Bashan, Yoav Bashan. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997—2003)[J].Water Research,2004,19(38):4222-4246.

[6] Luz Estela González, Rosa Olivia Cárdenas, Sandra Baena. Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*[J]. Bioresource Technology, 1997,60(3):259-262.

[7] Sebnem Aslan, Ilgi Karapinar Kapdan. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae [J]. Ecological Engineering, 2006,28(1): 64-70.

[8] M E Martínez, S Sánchez, J M Jiménez, et al. Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus* [J].Bioresource Technology,2000,73 (3): 263-272.

[9] 张静霞. 利用微藻处理污水的研究进展及发展趋势[J].现代农业科技,2008(4):206-207.

[10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[11] 王娟,陈必铨,王明兹,等. 培养条件对紫球藻生长及代谢产物产生的影响[J].福建师范大学学报:自然科学版,2004,20(3):63-66.

[12] P S Lau, N F Y Tam, Y S Wong. Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater [J].Environmental Pollution,1995,89(1):59-66.

[13] 郭羽丰,段舜山,李爱芬,等. 四列藻继氮磷胁迫后的超补偿生长[J]. 海洋科学, 2005,5(29): 37-42.

[14] 陈海魁,张鑫.生物超补偿生长的研究现状和应用前景[J].甘肃农业,2009(3):46-47.

[15] 张小兵. 三角褐指藻在营养盐限制下的补偿生长效应[D].广州:暨南大学,2007.

[16] Juan-Pablo Hernandez, Luz E de-Bashan, Yoav Bashan. Starvation enhances phosphorus removal from wastewater by the microalga *Chlorella* sp. co-immobilized with *azospirillum brasilense* [J]. Enzyme and Microbial Technology,2006,38(1-2):190-198.

(下转第39页)



口的水样浊度基本稳定在 65.0~66.8 NTU Zeta 电位基本稳定在 -13.6~-13.7 mV; 投加 PAFC+PAM 时, 测得翼片隔板反应区同一取样口的水样浊度基本稳定在 63.0~65.0 NTU Zeta 电位基本稳定在 -13.0~-13.2 mV。证明了澄清器运行情况基本稳定。

当澄清器运行稳定后, 在清水区同一取样点取水样, 单独投加 PAFC 时, 投药量为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 处理后水样的浊度为 2.56 NTU, 水样中颗粒物的 Zeta 电位为 -6.82 mV, 出水中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率分别为 44.5% 和 85.8%; 投加 PAFC+PAM 时, PAM 和 PAFC 投药量均为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 处理后水样的浊度为 2.13 NTU, 水样中颗粒物的 Zeta 电位为 -5.36 mV, 出水中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{UV}_{254}$  的去除率分别为 72.0% 和 87.7%, 可见联合投加优于单独投加。

#### 参考文献:

- [1] 肖衍繁, 李文斌. 物理化学 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1997: 432-434.
- [2] Edrwald J K. Coagulation In drinking water treatment: particles, organics and coagulantst[J]. Wat Sci Tech., 1993, 27(11): 21-25.
- [3] 刘文君, 贺北平. 生物预处理对受有机污染源水中胶体 Zeta 电位的影响研究[J]. 中国给水排水, 1996, 12(4): 27-29.
- [4] 王晓敏, 王亮, 李风亭, 等. 混凝剂对胶体电动电位的影响研究[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(2): 7-9.
- [5] 王利平, 杨炳武. 水中胶粒 Zeta 电位及影响混凝效果的研究[J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(4): 484-486.
- [6] 狄平宽, 单忠健. 无机电解质和有机高分子絮凝剂对高岭土表面 Zeta 电位的影响[J]. 水处理技术, 1991, 17(6): 394-398.
- [7] 王绍文. 论絮凝的动力致因[C]. 给水与废水处理国际会议论文集, 1994: 186-190.

## STUDY ON ZETA POTENTIAL OF THE PARTICULATE MATTER IN MICRO-VORTEX HYDRO CLARIFIER

Tong Xueqiang, Xu Zhibiao, Cao Xiuru

(Guang Dong Urban & Rural Planning And Design Institute, Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** The micro-vortex clarifier of high density reticular flocculation was designed based on the research hotspot of high density clarifying technology and in combine with vortex diffusion, sludge suspension layer, wing sheet type inclined plates theory and material balance calculation equation. The PAFC and PAM were selected as flocculants by static experiment. The turbidity of water sample in wing reacting area was 65.0~66.8 NTU and Zeta potential was -13.6~-13.7 mV with adding PAFC. The turbidity of water sample in wing reacting area became 63.0~65.0 NTU and Zeta potential was -13.0~-13.2 mV with adding PAFC+PAM.

**Keywords:** zeta potential; micro-vortex; hydraulic clarifier; plug-flow-reactor

(上接第 35 页)

## EFFECT OF INITIAL CELL DENSITIES AND STARVATION TREATMENT ON THE NITROGEN, PHOSPHORUS REMOVAL PROPERTIES OF *SCENEDESMUS* SP. LX1

Tang Huijun<sup>1</sup>, Li Xin<sup>2</sup>, Hu Hongying<sup>2</sup>, Gan Ke<sup>1</sup>, Guan Dongming<sup>1</sup>

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2.State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The effects of initial cell densities and starvation treatment on the nitrogen, phosphorus removal properties of *Scenedesmus* sp. LX1 were studied to explore methods for increasing removal efficiencies. In the studied range of  $0.125 \times 10^6 \sim 12.5 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$ , the nitrogen and phosphorus removal efficiencies of *Scenedesmus* sp. LX1 with initial cell density of  $12.5 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$  were the best, after a culture period of 3 d the TN and TP removal efficiencies were 74.7% and 100%, and the removal rates were  $3.73$  and  $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  respectively. *Scenedesmus* sp. LX1 grew well after a starvation period of 3 d, and after a culture period of 5 d the TN and TP removal efficiencies were 51.3% and 82.2%, the removal rates were  $1.54$  and  $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  respectively, higher than those of the control group by 24.4% and 60.2% respectively. It is concluded that high initial cell densities and starvation treatment are beneficial to enhance the nitrogen and phosphorus removal efficiencies of *Scenedesmus* sp. LX1.

**Keywords:** *Scenedesmus* sp; nitrogen and phosphorus removal; initial cell densities; starvation treatment