

不同类型底栖藻对养殖废水中苦草生长的影响

裴国凤¹ 李金秋¹ 谭好臣² 胡江¹

(1 中南民族大学 生命科学学院 武汉 430074; 2 潍坊市峡山水库管理局, 潍坊 261325)

摘要 以底栖藻和沉水植物代表苦草为研究对象,研究了丝状底栖藻毛枝藻、刚毛藻和底栖藻类复合体藻垫等不同类型的底栖藻在与苦草混合培养时,培养系统对高营养负荷猪粪废水中氮磷的去除效率及不同底栖藻类对苦草生长的影响。结果表明:不同底栖藻-苦草处理系统对高磷负荷(8 mg/L)猪粪废水中的 COD 有较好的去除效果,去除率均高于 87%。其中,藻垫-苦草系统的化学需氧量(COD)、总磷和总氮的去除率最高;在中等磷浓度(4 mg/L)条件下,藻垫-苦草系统去除废水磷的效果最好。底栖藻类的存在减缓了营养负荷对苦草生长的抑制效应;在中等磷浓度条件下,藻垫和苦草共培养,最有利于苦草的恢复重建。

关键词 底栖藻类;苦草;养殖废水;氮磷去除;磷滞留

中图分类号 X8831 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2018)04-0040-05

Effects of Different Types of Benthic Algae on the Growth of *Vallisneria natan* in Aquaculture Wastewater

Pei Guofeng¹, Li Jinqiu¹, Tan Haochen², Hu Jiang¹

(1 College of Life Sciences, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

2 Weifang Xiashan Reservoir Administration, Weifang 261325, China)

Abstract The removal efficiency of nitrogen and phosphorus in high phosphorus loading piggery wastewater was studied with different types of benthic algae-*V. natan* systems (periphyton mats -*V. natan*, filamentous benthic algae-*V. natan*) in laboratory-scale experiment. The benthic algae included benthic periphyton mats and two types of filamentous benthic algae: *Cladophora* sp., *Stigeoclonium* sp. Furthermore, the influence of different benthic algae on the growth of *V. natan* was studied. The results indicated that benthic algae-*V. natan* systems had potential to remove COD (Chemical oxygen demand) in high phosphorus loading piggery wastewater (8 mg/L) and the removal rate was over 87%. Periphyton mats -*V. natan* systems had better removal rates of COD, TP (Total Phosphorus) and TN (Total Nitrogen) than the other two systems. Besides, the best removal efficiency of phosphorus of periphyton mats -*V. natan* was in medium phosphorus concentration (4 mg/L). The presence of benthic algae slowed down the inhibiting effect of nutrient loading on the growth of *V. natan*. Additionally, the wastewater mixed with periphyton mats and in medium phosphorus concentration were the most favorable condition for the re-establishment of *V. natan*.

Keywords Benthic algae; *Vallisneria natan*; aquaculture wastewater; removal of nitrogen and phosphorus; phosphorus retention

恢复和构建高等水生植物群落尤其是沉水植物是改善富营养化湖泊水质的一种有效的手段,但是,如果水体的氮磷浓度过高则会抑制沉水植物的生长^[1],因此,若要在这些浅水富营养化湖泊中恢复沉水植物,就必须先降低水体的营养负荷^[2]。底栖藻类通过降低水体营养盐的浓度、吸附和沉淀悬浮沉积

物、提高水体透明度,为沉水植物的恢复创造了条件^[3]。对淡水生态系统营养盐循环及沉水植物的分布具有重要的影响。底栖藻垫是以底栖藻类为主要组成成分的生物聚合体。苦草(*Vallisneria natan*)为我国常见的多年生沉水植物,常作为富营养化水体沉水植物恢复重建品种。

收稿日期 2018-10-11

作者简介 裴国凤(1969-),女,教授,博士,研究方向:藻类环境生物学, E-mail: peigf@mail.scuec.edu.cn

基金项目 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(CZW18016)

底栖藻垫和苦草混合培养时滞磷能力均增强^[4], 藻垫的存在可以减缓高浓度氮磷对苦草的胁迫效应^[5]. 将沉水植物苦草和金鱼藻分别和底栖藻类混合培养, 底栖藻类的生物量显著减少, 表明在浅水湖泊或沼泽中, 某些沉水植物能有效地阻止底栖藻垫的过度蔓延生长, 以免其破坏生态系统的稳定性^[6]. 目前有关不同类型底栖藻类的存在对苦草生长影响的研究较少, 本研究测定了不同类型的底栖藻类(毛枝藻、刚毛藻和底栖藻垫)-苦草处理系统对高营养负荷猪粪废水中氮磷的去除率、藻垫在不同磷浓度条件下对磷的滞留能力和苦草中丙二醛含量的变化, 以探究在高营养负荷养殖废水中不同类型底栖藻类对苦草生长的影响, 为富营养化浅水水体的磷污染治理及其沉水植物的恢复重建提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料的采集与制备

以大理石(15 cm×8 cm×1 cm)作为人工基质, 清洗干净并晾干, 置于南湖沿岸(水深 20~30 cm)进行原位培养, 两周后将生长有底栖藻类的人工基质回收. 毛枝藻和刚毛藻来源于本实验室培养种, 用改良朱氏 10 号培养液培养, 培养温度为 18~22 °C, 每隔 2 d 更换新鲜培养液, 同时清除杂藻和污染^[7]. 苦草取样于武汉植物园某池塘, 放置于温室玻璃缸内进行预培养, 预培养的温度和光照与后续实验相同, 预培养二周后挑取生长状态好的苦草用于后续实验. 猪粪废水采集于武汉白沙洲某养猪场.

1.2 设置与培养条件

实验设置 5 个处理组, 每组 3 个平行. 在玻璃缸(40 cm×30 cm×30 cm)底均匀覆盖一层约 5 cm 厚的细沙, 将长有底栖藻类的人工基质置于沙上, 预培养的苦草均匀置于各处理组系统中, 并加入 18 L 不同磷浓度的猪粪废水(表 1). 在室内温度为 22±2 °C 的温室内进行. 以 40 W 日光灯为光源, 同时在每个玻璃缸里设置 1 个曝气头, 并调节至相同的曝气速度, 实验周期为 32 d.

表 1 实验设计和条件

Tab.1 Experimental design and conditions

组别	材料	各组的起始浓度/(mg·L ⁻¹)	
		总磷	总氮
A 组(高磷浓度)	毛枝藻 15g+苦草 30.1g	7.92	22.10
B 组(高磷浓度)	刚毛藻 15g+苦草 30.7g	7.81	18.57
C 组(高磷浓度)	藻垫 72.4g+苦草 30.8g	7.88	21.13
D 组(中磷浓度)	藻垫 72.4g+苦草 30.6g	3.88	8.62
E 组(低磷浓度)	藻垫 72.4g+苦草 30.0g	0.35	3.75

1.3 测定项目

1.3.1 水体理化指标的测定

定期测定各处理系统水体的化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总溶解性磷(TDP)、可溶性磷(SRP)、总氮(TN)和总溶解性氮(TDN), 参照国家环保局制定的标准方法^[8].

1.3.2 苦草生理指标的测定

实验开始和结束时分别测定各组苦草的鲜重, 定期测定各组苦草叶片丙二醛(MDA)的含量, MDA 的测定参照文献^[9].

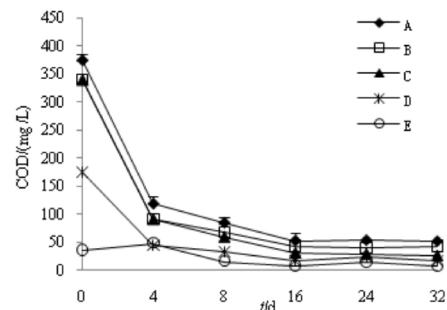
1.3.3 底栖藻类生理指标的测定

实验开始和结束时分别测定各组底栖藻垫的鲜重、干重和总磷含量^[10], 同时计算底栖藻垫的最大磷去除率(MRP), 参照 Guzzon 等的方法^[11].

2 结果与讨论

2.1 不同类型底栖藻类对废水中 COD 的去除

不同处理系统水体中的 COD 含量随处理时间的变化见图 1. 可见不同类型底栖藻-苦草处理系统对水体 COD 均具有良好的去除效果, 对水体 COD 的去除率均大于 87%, 毛枝藻-苦草系统(A 组)、刚毛藻-苦草系统(B 组)和藻垫-苦草系统(C 组)对水体 COD 的去除率分别为 87.5%、88.2% 和 92%, 其中, 藻垫-苦草系统对水体 COD 的去除率最高, 为 92%; 同时不同磷浓度条件下的藻垫-苦草系统对水体 COD 的去除结果表明, 在高磷浓度(7.88 mg/L)条件下, 藻垫-苦草系统对 COD 的去除率高于在中、低磷浓度下的去除率.



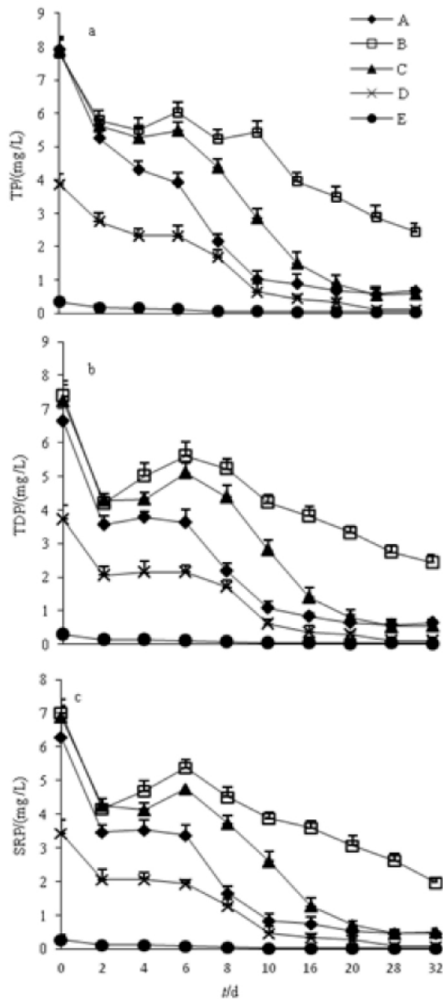
A) 毛枝藻(高磷); B) 刚毛藻(高磷); C) 藻垫(高磷); D) 藻垫(中磷); E) 藻垫(低磷)

图 1 不同类型底栖藻-苦草系统对养殖废水中 COD 的去除

Fig.1 Removal of COD in wastewater with different types of benthic algae-Vallisneria natans systems

2.2 不同类型底栖藻类对废水中磷的去除

所有处理系统水体的 TP、TDP 和 SRP 的浓度随处理时间的增加而降低(图 2)。



A) 毛枝藻(高磷); B) 刚毛藻(高磷); C) 藻垫(高磷); D) 藻垫(中磷); E) 藻垫(低磷)

图 2 不同类型底栖藻-苦草系统水体磷含量的变化
Fig.2 The dynamic changes of phosphorus content in wastewater with different types of benthic algae- *Vallisneria natans* systems

高磷浓度条件下,藻垫-苦草系统(C组)对水体中的 TP 的去除率达到 92.7%,高于刚毛藻-苦草系统(B组)和毛枝藻-苦草系统(A组)的去除率(图 2a);不同磷浓度条件下,藻垫-苦草处理系统在中等磷浓度(4 mg/L)(D组)下对水体中 TP 的去除效果最好,达到 97.4%。丝状绿藻和底栖藻垫分别处理高磷浓度废水研究表明,底栖藻垫对废水中总磷的去除率(70%)高于丝状绿藻(85%)^[12]。

本文有类似结果,在高浓度条件下,藻垫-苦草系统对水体 TP 的去除率也高于丝状底栖绿藻-苦草系统的去除率。

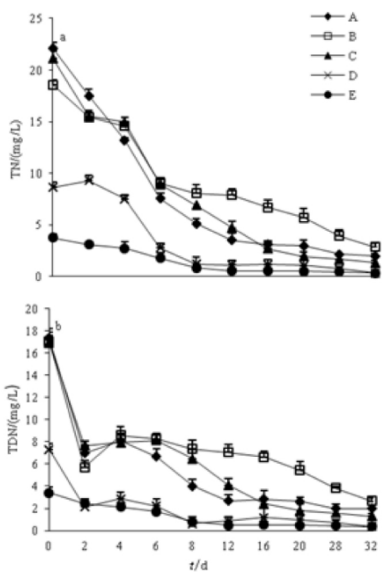
各处理系统水体中的 TDP 含量和 TP 含量比较接近,说明各处理系统水体中的磷主要以可溶性磷的形式存在(图 2a, 2b)。高磷浓度条件下,藻垫-苦草系统对水体 TDP 的去除率达到 92.5%,同样高于另外两种系统对水体 TDP 的去除率(图 2b);不同磷浓度条件下,藻垫-苦草处理系统在中等磷浓度下对水体中 TDP 的去除效果最好,达到 97.3%。

在高磷浓度下,藻垫-苦草系统和毛枝藻-苦草系统对水体 SRP 的去除率均达到 92%,刚毛藻-苦草系统的去除率为 72%;在不同磷浓度条件下,处理前 2 d,藻垫高磷浓度组(C组)对水体 SRP 的去除率最高,中磷浓度组(D组)次之,低磷浓度组(E组)最小;32 d 后,高、中、低磷浓度下的藻垫-苦草处理系统对水体 SRP 的去除率分别达到 92.7%, 97.5%, 94.0%(图 2b),其中,中磷浓度下的藻垫-苦草处理系统对水体 SRP 的去除率最高。在处理初期,藻垫-苦草系统在高浓度条件时对水体 SRP 的去除率最高。其他研究也有相似研究结果^[13]。

2.3 不同类型底栖藻类对废水中氮的去除

各处理系统水体 TN 含量在前 8 d 大幅度下降,第 8 d 时各处理系统对水体 TN 的去除率已超过 56%;在高浓度条件下,毛枝藻-苦草系统(A组)、刚毛藻-苦草系统(B组)和藻垫-苦草系统(C组)对水体 TN 的去除率分别为 91%、84%、94%,其中,毛枝藻-苦草系统和藻垫-苦草系统对水体 TN 的去除率达到 90%以上,藻垫-苦草系统对水体 TN 的去除率高于毛枝藻-苦草系统(图 3a);不同氮浓度条件下,藻垫-苦草系统在中等氮浓度(9 mg/L)(D组)条件下对水体中 TN 的去除效果最好,达到 95.9%,在第 8 d 时,其对水体 TN 的去除率已达 86%。这表明当底栖藻类和苦草共存时,系统仍能保持对水体氮磷较高的去除率。

在第 8 d 各处理系统对水体 TDN 的去除率均已超过 57%;在高浓度条件下,藻垫-苦草系统对 TDN 的去除率最高,达到 93.8%(图 3b);藻垫-苦草系统在中等氮浓度(9 mg/L)(D组)时对废水中 TDN 的去除效果最好,达到 95.1%。在第 8 d,其对水体 TDN 的去除率已达 91%。



A) 毛枝藻(高磷); B) 刚毛藻(高磷); C) 藻垫(高磷);
D) 藻垫(中磷); E) 藻垫(低磷)

图 3 不同类型底栖藻-苦草系统水体氮含量的变化
Fig. 3 The dynamic changes of nitrogen content in wastewater with different types of benthic algae-*Vallisneria natans* systems

2.4 不同类型底栖藻类对苦草生长的影响

在实验开始(第 0 d)和结束(第 32 d)时分别测定各处理系统中苦草的鲜重.高浓度条件下的 A 组、B 组、C 组中苦草鲜重分别增加约 17、22.2 和 27.5 g,其中,藻垫与苦草混合培养时苦草鲜重增加的最多(表 2),说明和刚毛藻、毛枝藻相比,藻垫与苦草共存时更有利于苦草的生长.

不同处理系统中苦草 MDA 含量的变化表明(图 4),前期(第 8 d)毛枝藻-苦草系统、刚毛藻-苦草系统和藻垫-苦草系统中苦草 MDA 含量分别上升了 0.017、0.014 和 0.009 $\mu\text{mol/g}$,其中,藻垫-苦草系统中苦草 MDA 含量的增加量明显小于毛枝藻-苦草系统和刚毛藻-苦草系统中苦草 MDA 含量的增加量($p < 0.05$).说明与毛枝藻和刚毛藻相比,藻垫能减小高浓度污染对苦草的伤害;实验结束时,这 3 种处理系统的苦草 MDA 的含量基本恢复到处理前的水平,说明底栖藻类能促进苦草对高浓度废水的适应.而单独培养苦草则会受到严重胁迫^[5].

表 2 不同类型底栖藻-苦草系统中苦草生物量的比较

Tab.2 Comparison of *Vallisneria natans* biomass in different types of benthic algae-*Vallisneria natans* systems

苦草鲜重/g	组别				
	A	B	C	D	E
初始	30.1±0.25	30.8±0.61	30.7±0.53	30.6±0.75	30±0.55
结束	47.1±0.34	53±0.66	58.2±0.82	70±1.25	48.6±0.4

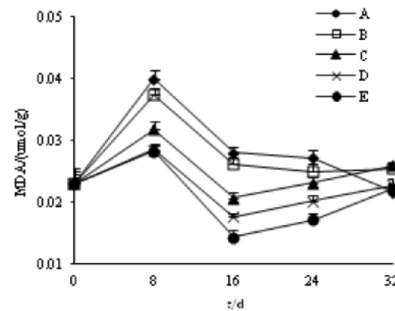
2.5 不同磷浓度处理对苦草生长的影响

在高(C组)、中(D组)、低磷3种(E组)条件下,分别将藻垫和苦草混合培养.在第32 d 3种磷浓度条件下的苦草鲜重分别增加约 27.5、39.4 和 18.6 g,其中,中等磷浓度(D组)下苦草鲜重增加的最多(表 2),说明对于藻垫-苦草系统而言,中等磷浓度(约 4 mg/L)的水体环境最适合苦草的生长.

在第 8 d,高、中、低 3 种磷浓度条件下的苦草 MDA 含量分别上升了 0.0087、0.0054 和 0.0053 $\mu\text{mol/g}$,其中,中等磷浓度条件下苦草 MDA 含量的增加量明显小于高磷浓度下苦草 MDA 含量的增加量($p < 0.05$)(图 4),表明中等磷浓度水体环境更适合苦草的生长.苦草的生物量和 MDA 含量变化表明,藻垫和苦草共培养,且在中等磷浓度条件下,最有利于苦草的恢复重建.

2.6 不同类型底栖藻类总磷含量的比较

实验结束时,毛枝藻、刚毛藻和藻垫的总磷增加量依次约为:3.1、2.48、0.7 $\text{mg/g} \cdot \text{DW}$,其中毛枝藻的总磷增加量最大,约为 3.1 $\text{mg/g} \cdot \text{DW}$,刚毛藻次



A) 毛枝藻(高磷); B) 刚毛藻(高磷); C) 藻垫(高磷);
D) 藻垫(中磷); E) 藻垫(低磷)

图 4 不同类型底栖藻-苦草系统中苦草 MDA 含量的变化
Fig.4 The dynamic changes of MDA content of *Vallisneria natans* in different types of benthic algae-*V. natans* systems

之,毛枝藻和刚毛藻的总磷增加量都明显大于藻垫($p < 0.05$),藻垫的总磷增加量最小,约为 0.7 $\text{mg/g} \cdot \text{DW}$,表明丝状底栖藻类具有更强的短期磷滞留潜力(表 3).这可能是由于松散的丝状藻具有良好过滤作用^[14],能为去除水体的悬浮颗粒物提供很大的表面积,进一步增强了其滞磷能力.

表 3 不同类型底栖藻类总磷含量的比较

Tab.3 Comparison of total phosphorus content in different types of benthic algae

底栖藻类 TP 含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{DW}$)	组别		
	A	B	C
初始时	3.05±0.52	6.15±0.63	2.62±0.12
结束时	6.15±0.55	8.63±0.42	3.32±0.24

2.7 不同磷浓度下底栖藻垫的生物量及最大磷去除率比较

高、中、低 3 种磷浓度条件下藻垫鲜重增加量依次为 38.9、28.3 和 7.6 g, 其中, 高磷浓度(C 组)的藻垫鲜重增加最多, 中磷浓度次之, 低磷浓度最小(表 4)表明高磷浓度更有利于藻垫生物量的增加。因此, 底栖藻类的生物量随着氮磷浓度的增大而增加, 当氮磷浓度达到最高值, 其生物量也达到最大值^[13, 15]。

比较不同磷浓度条件下藻垫的最大磷去除率, 结果表明高、中、低 3 种磷浓度条件下藻垫最大磷去除率依次为 3.00、1.99 和 0.26 $\text{mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 其中, 高磷浓度(C 组)下藻垫的最大磷去除率最高, 为 3.0 $\text{mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 中磷浓度次之, 低磷浓度最小, 为 0.26 $\text{mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ (表 4)。

表 4 不同磷浓度下底栖藻垫的生物量及最大磷去除率比较

Tab.4 Comparison of biomass and maximum phosphorus removal rate of periphyton mats under different phosphorus concentrations

组别	C	D	E
初始时藻垫鲜重/g	72.4±0.73	72.4±0.64	72.4±0.81
结束时藻垫鲜重/g	111.3±1.05	100.7±0.72	80±0.9
藻垫最大磷去除率 /($\text{mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	3.00	1.99	0.26

3 结语

(1) 藻垫-苦草系统的 COD、总磷和总氮的去除率高于刚毛藻、毛枝藻-苦草系统。

(2) 高浓度的猪粪废水会对苦草产生短期的逆境胁迫, 但底栖藻类的存在, 减缓了营养负荷对苦草生长的抑制效应。

(3) 不同类型底栖藻滞留总磷的能力不同, 与藻垫相比, 丝状底栖藻具有更强的短期磷滞留潜力。

参 考 文 献

[1] Kowalczewski A, Ozimek T. Further long-term changes in the submerged macrophyte vegetation of the eutrophic Lake Mikolajskie [J]. Aquatic Botany, 1993, 46(3-4): 341-345.
[2] 秦伯强, 宋玉芝, 高 光. 附着生物在浅水富营养化湖泊

藻-草型生态系统转化过程中的作用 [J]. 中国科学, 2006, 36(3): 283-288.

- [3] 宋玉芝, 秦伯强, 高 光. 附着生物对富营养化水体氮磷的去除效果 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 180-185.
[4] 裴国凤, 何 月, 顾新跃 等. 底栖藻类-苦草对猪粪废水中磷的滞留作用研究 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 32-36.
[5] 顾新跃, 何 月, 张秀青 等. 底栖藻类-苦草对猪粪废水中营养物质的去除效果 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1625-1630.
[6] Gette-Bouvarot M, Mermillod-Blondin F, Lemoine D, et al. The potential control of benthic biofilm growth by macrophytes—A mesocosm approach [J]. Ecological Engineering, 2015, 75: 178-186.
[7] 祖国辉, 包文美, 王全喜 等. 三种毛枝藻的培养研究及其异丝性特征 [J]. 植物分类学报, 2006, 44(6): 654.
[8] 国家环境保护总局. 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.
[9] 陈兰洲, 汪 静, 武艳芳 等. 纤细席藻对重金属镍胁迫的响应研究 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 45-50.
[10] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments — a synthesis of recent works [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(2-3): 224.
[11] Guzzon A, Bohn A, Diociaiuti M, et al. Cultured phototrophic biofilms for phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Research, 2008, 42(16): 4357-4367.
[12] Cao J, Hong X, Pei G. Removal and retention of phosphorus by periphyton from wastewater with high organic load [J]. Water Sci Technol, 2014, 70(1): 62-69.
[13] Pizarro C, Kebede-Westhead E, Mulbry W. Nitrogen and phosphorus removal rates using small algal turfs grown with dairy manure. Journal of Applied Phycology, 2002, 14(6): 469-473.
[14] Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L, et al. Algal Ecology [M]. San Diego: Academic Press, 1996.
[15] Boelee N C, Temmink H, Janssen M, et al. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms [J]. Water Research, 2011, 45: 5925-5933.

(责任编辑 姚春娜)