

底栖藻类-苦草对猪粪废水中营养物质的去除效果

顾新跃, 何月, 张秀青, 王青, 裴国风*

(中南民族大学生命科学院, 武汉 430074)

摘要:为了探究底栖藻类和沉水植物(苦草)对猪粪废水的处理效果, 及苦草恢复重建的环境条件, 通过设置不同浓度的猪粪废水处理, 进行了为期 32 d 的室内模拟实验。结果表明:底栖藻类、苦草、底栖藻类-苦草处理组对高浓度猪粪废水的 COD 和氮、磷均存在显著的去除效果;COD 的最大去除率均大于 86%, 底栖藻类-苦草混合培养对高、中浓度猪粪废水中磷、氮的平均去除率分别大于 62% 和 70%, 高于二者单独培养的处理组(均小于 59% 和 65%)。实验期间, 底栖藻类、苦草和浮游藻类 Chla 含量的变化以及苦草的 CAT、MDA 含量变化表明, 高浓度的猪粪废水会对苦草产生短期的逆境胁迫, 但底栖藻类的存在可以减缓高浓度氮磷对苦草的胁迫效应, 在中浓度氮磷且有底栖藻类存在的条件下, 有利于苦草的恢复重建。

关键词:底栖藻类; 苦草; 营养物质; 去除效果; 逆境胁迫

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)08-1625-06 doi:10.11654/jaes.2014.08.022

Nutrient Removal Rates from Swine Wastewater Using Periphyton-*Vallisneria Natan*

GU Xin-yue, HE Yue, ZHANG Xiu-qing, WANG Qing, PEI Guo-feng*

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

Abstract: Water plants are often used to remove nutrients from wastewater. This research was conducted to assess the efficiency of nutrient removal from swine wastewater using biological treatment system in a laboratory-scale experiment with periphyton and submerged macrophyte-*Vallisneria natan* during 32 days. The systems included high, medium and low concentrations of nutrients in wastewater. The maximum removal rates of chemical oxygen demand (COD) were more than 86% at high concentrations. The average phosphorus (P) and nitrogen (N) removal rates were respectively over 62% and 70% for both high and medium concentrations in mixed nutrient systems, greater than in single nutrient systems (59% and 65%). Changes of physiological activities showed that *V. natan* suffered a short-term stress at high nutrient concentrations. However, such stresses could be alleviated by the presence of periphyton. In conclusion, the optimum condition for *V. natan* would be medium concentrations of nutrients with periphyton.

Keywords: periphyton; *Vallisneria natan*; nutrients; removal efficiency; adverse stress

底栖藻类和沉水植物作为水生态系统的重要初级生产者, 能消耗水体中的氮、磷等营养物质, 对水生生态系统的稳定发挥着重要作用。植物生态修复优于传统理化方法, 是国内外学者研究的热点。利用大型水生植物及用其构建的人工湿地, 能有效去除水体中的氮、磷、COD 等营养物质^[1-2], 因而是重建和恢复沉水植被成为修复富营养化湖泊的有效途径^[3]。目前, 国

外利用底栖藻类对水质进行处理的报道较多^[4-5], 近年来, 我国也出现了利用底栖藻类去除水体中氮、磷等营养物质的报道^[6]。

因为这些研究多以底栖藻类或苦草作为单一的研究对象, 而有关二者共同存在于一个处理系统的研究较少, 富营养化浅水湖泊的沿岸带存在着大量的底栖藻类和沉水植物, 所以研究底栖藻类和沉水植物的相互关系, 对于沉水植物的衰退机理或重建都意义重大。苦草作为我国最常见的沉水植物, 常被作为富营养化水体植被恢复工程的主要选用品种^[7]。有研究认为苦草比较适合在富营养化水体中生长, 但氮磷营养盐浓度过高将抑制苦草的光合生理活动, 从而影响苦

收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(30970550); 国家级大学生创新创业训练项目(GCX13105); 国家民族药理学实验教学中心(4067)

作者简介: 顾新跃(1992—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 学士, 从事环境科学研究。E-mail: heyue19900328@126.com

* 通信作者: 裴国风 E-mail: peigf@mail.scuec.edu.cn

草的生长^[8],而底栖藻类对高浓度的氮磷营养物质具有较好的去除能力,能使水质中氮磷含量降低到较低水平,因此探究底栖藻类-苦草对氮磷等物质的处理效果十分必要,进一步探讨苦草与底栖藻类共存时苦草对不同浓度废水的生理响应,能够为沉水植被的恢复和重建提供科学依据。

本实验以富营养化湖泊原位培养的底栖藻类群落及苦草为研究对象,通过静态模拟实验,研究底栖藻类-苦草对不同浓度的猪粪废水中营养物质的去除效果,探讨沉水植物恢复重建的最佳条件,旨在为污水处理和富营养湖泊治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料的采集与制备

用花岗岩(15 cm×8 cm×1 cm)作为人工基质,清洗干净并晾干,置于武汉城区的东湖沿岸带(水深20~30 cm)进行原位培养,20 d后将生长有底栖藻类的人工基质收回,同时采集沿岸带苦草,在温室内用取样点的湖水预培养1周。将在养猪场采集的新鲜猪粪处理后用于制备一定浓度的猪粪废水。

1.2 实验设置和培养条件

本试验处理系统使用5个玻璃缸(60 cm×22 cm×24 cm),共设置5个处理组,A组放置5块藻垫(初始总Chla现存量 $5.2\sim 5.8\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)单独培养,B组种植10株苦草单独培养,C、D、E组均为5块藻垫和10株苦草混合培养;缸底均铺有约5 cm厚的细沙,分别装有18 L不同浓度的猪粪废水。实验在21~24℃的温室内进行,以日光灯为光源,表层光照强度为 $48\sim 52\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,同时在每个玻璃缸里设置1个曝气头,并调节至相同曝气速度。实验周期为32 d。

1.3 测定项目和分析方法

每隔2 d(或4 d),测定各处理系统的总磷(Total phosphorus, TP)、总溶解性磷(Total dissolved phosphorus, TDP)、可溶活性态磷(Soluble reactive phosphorus, SRP)、总氮(Total nitrogen, TN)、总溶解性氮(Total dissolved nitrogen, TDN)和化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)的浓度,参照国家环保局制定的标准方法^[9],同时测定底栖藻类、浮游藻类、苦草的生物量,以叶绿素a(Chla)的含量表示。底栖藻类、浮游藻类Chla含量的测定方法参照APHA^[10],苦草Chla含量的测定参照孔祥生等^[11]的方法。每隔7 d测定1次各处理系统苦草叶片的丙二醛(MDA)含量和过氧化氢酶(CAT)活性,其中MDA的测定参照张以顺等^[12],

CAT的测定参照杨兰芳等^[13]。实验开始和结束时分别测定各处理组苦草的鲜重。

1.4 数据处理及分析

N、P的去除率: $R_n=(C_0-C_n)/C_0$

式中: R_n 为第 n 天时藻类对营养物质的去除率; C_0 为营养物质的初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_n 为第 n 天营养物质的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

统计学分析包括单因素方差分析(AVNON)和相关性分析,均采用SPSS 19.0完成。

2 结果与分析

2.1 底栖藻类-苦草处理系统的水质净化效果

在5个处理组中,A、B、C为高浓度组(初始TP为 $8\sim 11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),D为中浓度组(初始TP为 $3\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),E为低浓度组(初始TP为 $0.1\sim 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。在整个试验期间,不同处理组COD随处理时间的增加而下降,A、B组对COD的去除效果较好(图1),均由初始浓度($>280\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)降至 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,COD的最大去除率均出现在试验的第16 d,分别为95.76%、91.64%。比较发现,C、D组COD去除效果明显优于E组,其中D组的去除效果最好,其COD的去除率为69.74%~92.87%,浓度由 $191.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $13.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;E组水中COD浓度在 $13.34\sim 24.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,未表现出显著处理效果,最大去除率仅为34.34%。

A~D处理组TP、TDP、SRP浓度都表现出显著下降趋势($P<0.05$),其中A~C组的TP、TDP、SRP在试验16 d后,均由高浓度($>7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)降至 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,处理后期的波动幅度较小(图1),最大去除率均在83%以上,平均去除率在53.20%~67.01%之间;D组的终浓度降至约 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且对TP、TDP、SRP的最大去除率均为90%左右。比较发现,C、D组对TP、TDP、SRP浓度的平均去除率均高于62%,高于A、B组(均小于59%)。E组的TP浓度由 $0.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大去除率可达64.97%,但去除效果不如C处理组显著($P<0.05$)。与此同时,E组水中TDP和SRP浓度表现出增长趋势(图1),均在第16 d达到最大值,分别为 0.15 、 $0.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

各组的TN、TDN具有相似的变化趋势,且A~C组TN、TDN的去除效果显著高于E组($P<0.05$)。到试验中后期(第16~32 d),A、B组TN、TDN浓度均降至 $1.5\sim 5.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,最高去除率均达85%以上;C组TN浓度可最低降至 $1.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其TN、TDN的最大

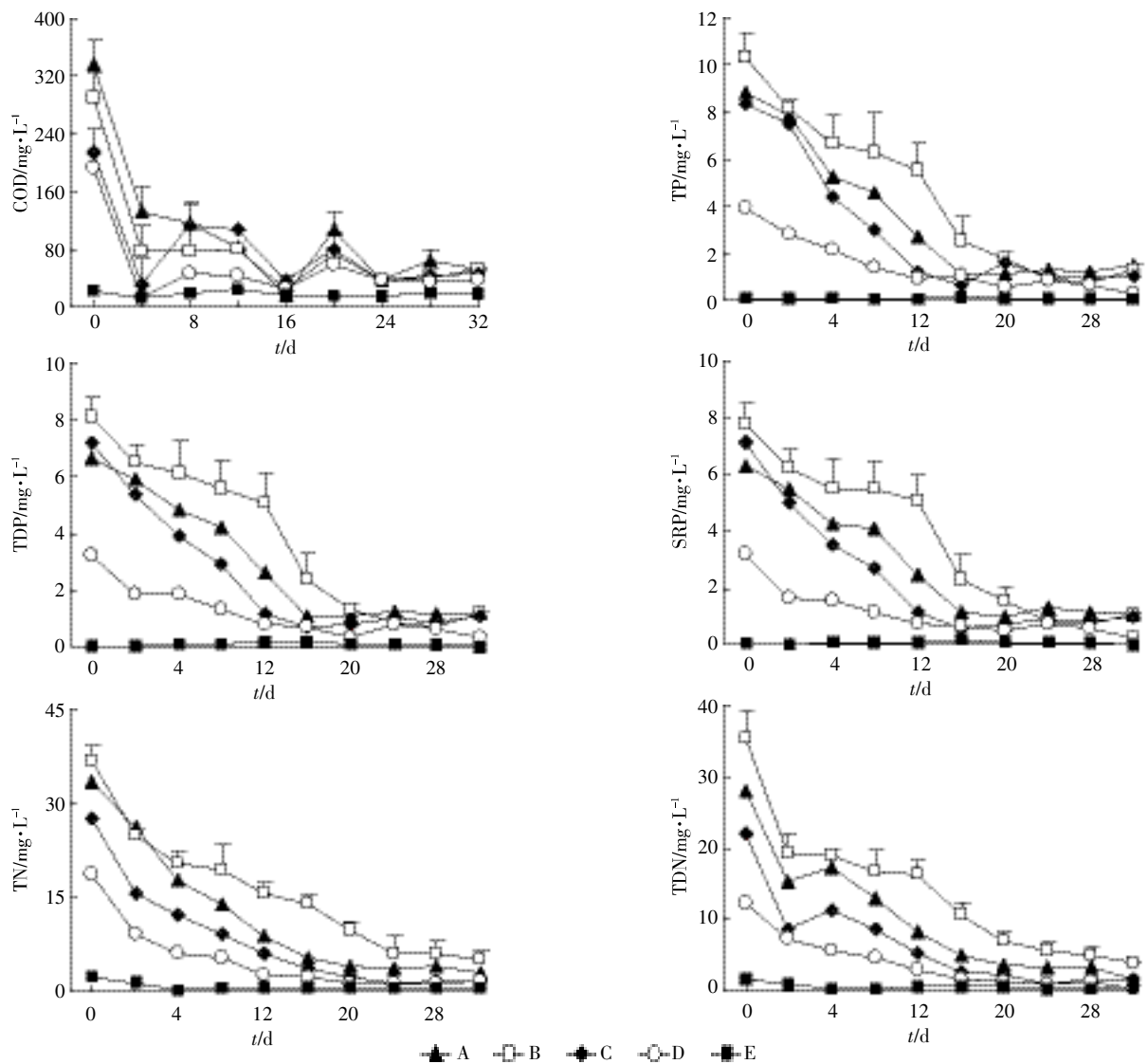


图 1 不同营养浓度下各营养物质的去除

Figure 1 Removals of COD, TP, TDP, SRP, TN and TDN at different concentrations of nutrients

去除率都为 95%左右(图 1)。在试验第 4 d,E 组 TN、TDN 浓度分别降至 1.9、1.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,C、D 组水质中 TN、TDN 的平均去除率均高于 70%,而 A、B、E 组水质中 TN、TDN 平均去除率均低于 65%。

2.2 底栖藻类、浮游藻类、苦草 Chla 含量变化

各组底栖藻类 Chla 含量在试验期间表现出不同的变化规律(图 2),其中 A 组在第 16 d 达到最高值($339.98 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),试验后期也一直处于较高水平。C、D 组的 Chla 含量均在第 12 d 达到最大值,分别为 227.89 、 $513.72 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;在试验后期,C 组 Chla 含量变化不大,但 D 组在第 20 d 后,Chla 的含量逐渐降低。E 组的底栖藻类基本上没有生长,其 Chla 含量从第 2 d 开始就逐渐降低。A、C 组底栖藻类在整个试验过程中脱落死亡现象不明显,而 D、E 组底栖藻类在试验

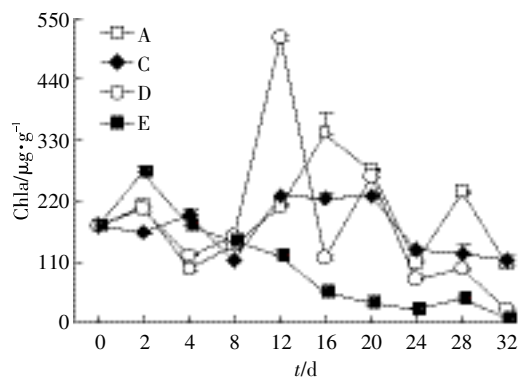


图 2 不同营养浓度下底栖藻类 Chla 含量的变化

Figure 2 Variations of chlorophyll a of periphyton over time at different concentrations of nutrients

中后期逐渐衰退脱落。

试验期间,A组浮游藻类 Chla 含量明显高于 B 组(图 3),A、B 组浮游藻类 Chla 含量平均值分别为 $19.3/6.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。C、D 组 Chla 含量(均值分别为 $22.46/16.13 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)高于 E 组(均值 $5.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。在试验后期(第 20 d 后),C 组 Chla 含量波动幅度较大,最高可达 $77.10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

各组苦草 Chla 含量均有短期的增长(图 4),其中 B~D 组最高值均在 $1.1 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,E 组最高值仅为 $0.79 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在试验第 4 d 后,各组苦草 Chla 含量均出现下降趋势,其中 B 组降幅最大,其 Chla 含量明显低于 C~E 组,而 C、D 组(均值分别为 $0.63/0.54 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)略高于 E 组(均值 $0.45 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.3 不同浓度的猪粪废水对苦草生化指标的影响

经过 32 d 的试验,各组苦草鲜重(表 1)具有显著性差异($P<0.05$)。实验结束时,各组苦草鲜重都有所增加,其中:D 组增加最多(约为 56.7g),E 组次之,B、C 组增量明显低于 D、E 组;C 组增量高于 B 组。

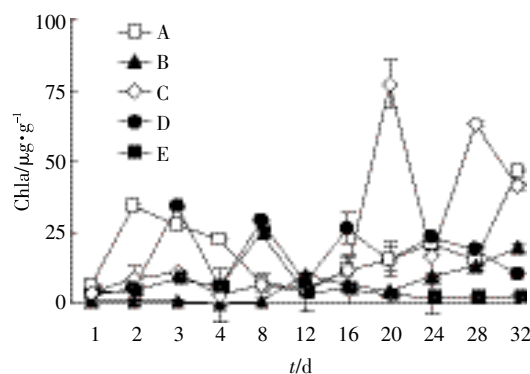


图 3 不同营养浓度下浮游藻类 Chla 含量的变化

Figure 3 Variations of chlorophyll a of phytoplankton over time at different concentrations of nutrients

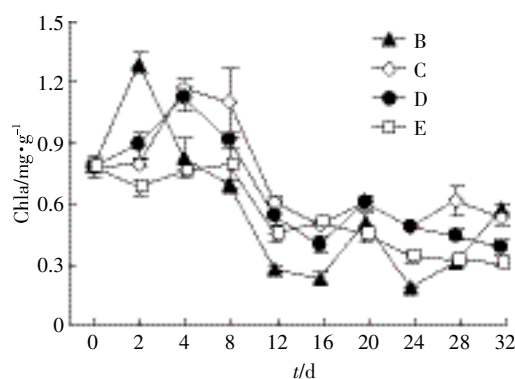


图 4 不同营养浓度下苦草 Chla 含量的变化

Figure 4 Variations of chlorophyll a of *V. natan* over time at different concentrations of nutrients

表 1 实验初始和结束时各组苦草鲜重

Table 1 Fresh weight of *V. natan* at different concentrations of nutrients before and after experiment

编号	B	C	D	E
实验前鲜重/g	44.5±0.30a	44.6±0.15a	44.6±0.26a	44.5±0.35a
实验后鲜重/g	51.7±2.9a	78.6±0.15b	101.3±0.44c	86.5±0.06d

注:不同字母表示数值之间差异显著($P<0.05$)。

试验的前 7 d,各组苦草的过氧化氢酶(CAT)活性都明显增加(图 5)。但 7 d 后,B 组苦草 CAT 活性呈上升趋势,C、D、E 组苦草的 CAT 活性呈下降趋势。

丙二醛(MDA)含量的多少反映脂膜在逆境环境中的伤害程度,含量越高其受伤害程度越大^[4]。试验期间,B、C 组苦草丙二醛含量高于 D、E 组,且 B 组略高于 C 组(图 6),说明高浓度猪粪废水对苦草的伤害程度高于中、低浓度组。B 组苦草受伤害程度最大,与实际观察到的现象一致(B 组苦草叶片在实验过程中变黑死亡);C 组苦草叶片有极少量变黑,但长势较好;D、E 组苦草出现分蘖,叶片较宽,颜色鲜绿。

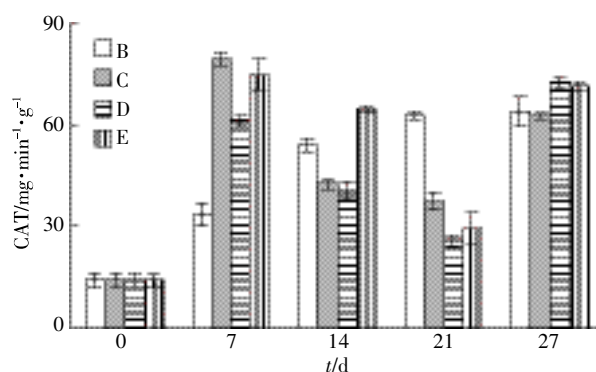


图 5 苦草过氧化氢酶活性的变化

Figure 5 Variations of catalase activity of *V. natan* over time at different concentrations of nutrients

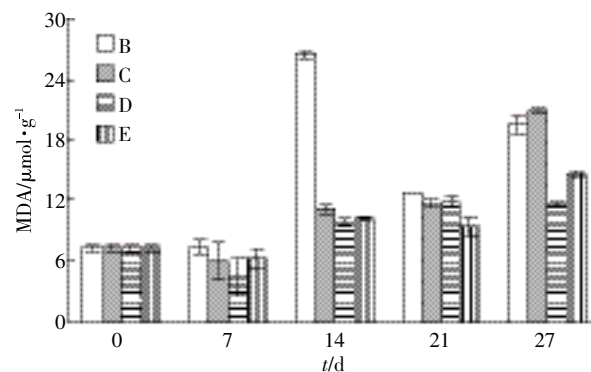


图 6 苦草丙二醛含量的变化

Figure 6 Variations of malondialdehyde content of *V. natan* over time at different concentrations of nutrients

3 讨论

3.1 底栖藻类-苦草对不同浓度猪粪废水中营养物质的去除效果

底栖藻类-苦草混合培养时对高浓度猪粪废水中COD的去除效果,与水葫芦对高浓度废水中COD的去除效果相当(最大去除率均在80%以上)^[15]。不同浓度组比较,底栖藻类-苦草对中浓度废水COD(D组)的处理效果最佳,但对低浓度废水(E组)COD的处理效果不显著。李龙山等^[16]研究表明,5种水生植物可将相当浓度(均约 $190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)废水中的COD最终降至 $8\sim 19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这可能与废水的种类、所用水生植物的种类不同有关。

比较底栖藻类废水处理研究结果发现,氮、磷污染物质的去除效果存在差异。Rectenwald等^[17]构建的底栖藻类-鱼系统对污水中磷有较高的去除率(达82%),但对氮的去除率却仅为23%。Murdock等^[18]利用底栖藻类处理农业污水,其对污水中TN的去除率可达62%,而对污水中TP的去除率仅为29%。梁霞等^[19]研究的底栖藻类水质处理系统也具有较高的氮去除率,而对水体中磷的去除存在一定限制。在本试验中,底栖藻类-苦草混合培养系统对中、高浓度氮磷物质的去除效果显著。在国外,对高浓度污水中氮、磷物质均有较好处理效果的以底栖藻类为主的“藻丛刷”系统、跑道池,已经得到了实际的应用^[20-21]。

3.2 苦草最佳生长条件探讨

苦草对富营养化水体中的氮磷有很好的去除效果,但是很少有将其用于污水处理的报道,主要是因为过高的营养负荷会对其产生逆境胁迫。研究认为在适宜范围内,较高的氮磷浓度可促进沉水植物的生长,但过高的氮磷浓度则会严重抑制其生长,甚至导致沉水植被消失^[22]。水体中较高的氮磷浓度对沉水植物而言,同盐胁迫、环境污染胁迫一样,会影响其正常生理活动^[23-24]。

本试验中高浓度组苦草MDA、CAT、Chla含量、鲜重的比较均表明,有底栖藻类存在时,苦草受伤害程度明显变轻,说明底栖藻类与苦草共存,有利于减缓高浓度废水对苦草的胁迫。底栖藻类能过量吸收超过其即时生长所需要的营养物质,储存在细胞内,并且这种能力与外部水体的营养负荷水平呈正相关^[4]。底栖藻类这种快速去除高营养物质的能力可能对苦草的生长有利,同时生态系统的多样性和复杂性的提高,有利于增强苦草的竞争力,这也是苦草与底栖藻

类共存时生长较好的另一重要原因。底栖藻类的存在可以减缓高浓度氮磷对苦草的逆境胁迫,但并不是苦草生长的最佳条件。在试验后期,高浓度组水体中浮游藻类Chla含量大幅增加,对苦草长期生长构成威胁,而低浓度组中苦草Chla含量也明显下降,只有中浓度组苦草的Chla含量一直处于较高水平,显示了较强的光合能力,是苦草长期生长的最佳条件。由此推测,在中浓度($\text{TP}=3\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{TN}\approx 18.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的猪粪废水中,与底栖藻类混合培养的苦草生长最好,最有利于其恢复重建。

4 结论

(1)不同培养系统对高浓度猪粪废水COD的最大去除率均大于86%;底栖藻类-苦草混合培养组对高、中浓度猪粪废水中磷、氮的平均去除率均大于62%和70%,高于二者单独培养的处理组(均小于59%和65%)。

(2)有底栖藻类的高浓度处理组中浮游藻类Chla的含量要高于苦草单独培养组。

(3)苦草Chla、MDA、CAT含量的变化显示高浓度猪粪废水对苦草生长产生短期的逆境胁迫,但底栖藻类的存在可以减缓这种胁迫效应,有利于苦草的恢复重建。

参考文献:

- [1] 王婷,耿绍波,常高峰. 人工湿地植物对生活污水净化作用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(Suppl1): 210-212.
WANG Ting, GENG Shao-bo, CHANG Gao-feng. Advances in studies on the purification of artificial wetland plants for sanitary sewage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(Suppl1): 210-212.
- [2] Kouki S, M'hiri F, Saidi N, et al. Performances of a constructed wetland treating domestic wastewaters during a macrophytes life cycle[J]. *Desalination*, 2009, 246(1): 452-467.
- [3] 黄玉源, 雷泽湘, 何柳静, 等. 不同磷浓度对水生植物苦草的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 12-16.
HUANG Yu-yuan, LEI Ze-xiang, HE Liu-jing, et al. Effects of phosphorus concentration of substrates to growth of *Vallisneria spiralis* L. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(2): 12-16.
- [4] Pietro K C, Chimney M J, Steinman A D. Phosphorus removal by the Ceratophyllum/periphyton complex in a South Florida(USA) freshwater marsh[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27(4): 290-300.
- [5] Wolfe III J E, Lind O T. Phosphorus uptake and turnover by periphyton in the presence of suspended clays[J]. *Limnology*, 2010, 11(1): 31-37.
- [6] 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): 695-704.

- MA Pei-ming, KUANG Qi-jun, LING Xiao-huan, et al. Study on efficiency of nitrogen and phosphorus removal by algal biofilm[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):695-704.
- [7] 陈开宁, 兰策介, 史龙新, 等. 苦草繁殖生态学研究[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3):487-495.
- CHEN Kai-ning, LAN Ce-jie, SHI Long-xin, et al. Reproductive ecology of *Valloisneria natans*[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3):487-495.
- [8] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. 环境科学, 2011, 32(9):2569-2575.
- SONG Yu-zhi, YANG Mei-jiu, QIN Bo-qiang. Physiological response of *Vallisneria natans* to nitrogen and phosphorus contents in eutrophic waterbody[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9):2569-2575.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Determination methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [10] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington D C: American Public Health Organisation. 1998.
- [11] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- KONG Xiang-sheng, YI Xian-feng. Plant physiology experimental techniques[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [12] 张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- ZHANG Yi-shun, HUANG Xia, CHEN Yun-feng. Plant physiology experimental guide[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [13] 杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 等. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性[J]. 现代农业科技, 2009(20):364-366.
- YANG Lan-fang, PANG Jing, PENG Xiao-lan, et al. Measurement of catalase activity in plants by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2009(20):364-366.
- [14] 刘晓培, 张饮江, 李岩, 等. 不同盐度对苦草生理特征的影响[J]. 生态学报, 2012, 31(6):606-612.
- LIU Xiao-pei, ZHANG Yin-jiang, LI Yan, et al. Effect of different salinity on physiological features of *Vallisneria natans*[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(6):606-612.
- [15] 黄惠珠, 叶夏, 黄秀声, 等. 水葫芦净化猪粪便污水效果的研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(4):105-108.
- HUANG Hui-zhu, YE Xia, HUANG Xiu-sheng, et al. Study on the purification effect of water hyacinth for pig excrement sewage[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008, 26(4):105-108.
- [16] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等. 5种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8):1625-1632.
- LI Long-shan, NI Xi-lu, LI Zhi-gang, et al. Growth characteristics and sewage cleaning effect of five wetland plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1625-1632.
- [17] Rectenwald L L, Drenner R W. Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(3):522-526.
- [18] Murdock J N, Shields Jr F D, Lizotte Jr R E. Periphyton responses to nutrient and atrazine mixtures introduced through agricultural runoff[J]. *Ecotoxicology*, 2013, 22(2):215-230.
- [19] 梁霞, 李小平, 史雅娟. 周丛藻类水质处理系统中氮、磷污染物去除效果研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4):695-704.
- LIANG Xia, LI Xiao-ping, SHI Ya-juan. Nutrient removal from contaminated river water using a periphyton water treatment system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4):695-704.
- [20] Mulbry W, Kangas P, Kondrad S. Toward scrubbing the bay: Nutrient removal using small algal turf scrubbers on Chesapeake Bay tributaries[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4):536-541.
- [21] DeBusk T A, Grace K A, Dierberg F E, et al. An investigation of the limits of phosphorus removal in wetlands: A mesocosm study of a shallow periphyton-dominated treatment system[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 23(1):1-14.
- [22] Ozimek T, Kowalczewski A. Long-term changes of the submerged macrophytes in eutrophic Lake Mikołajskie (North Poland)[J]. *Aquatic Botany*, 1984, 19(1):1-11.
- [23] Nielsen D L, Brock M A, Crosslé K, et al. The effects of salinity on aquatic plant germination and zooplankton hatching from two wetland sediments[J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(12):2214-2223.
- [24] Saunkaew P, Wangpakapattana Wong P, Jampeetong A. Growth, morphology, ammonium uptake and nutrient allocation of *Myriophyllum brasiliense* Cambess under high NH_4^+ concentrations[J]. *Ecotoxicology*, 2011, 20(8):2011-2018.