

盐生植物碱蓬在富营养化海水养殖尾水修复中的应用

王趁义, 郭炜超, 杨娜, 滕丽华, 赵欣园, 胡杰

(浙江万里学院生物与环境学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:为了考察盐地碱蓬(*Suaeda sala*)由内陆生境转移到海水生境后的生长情况及对海水养殖池塘水体修复的效果,配制了 4 种不同富营养化程度的水体,采用水培的方法,测定了碱蓬对水体中 COD、BOD₅、TN、TP 的处理效果及植株体内试验前后 TP、TN 含量的变化。结果显示,随净化时间的延长,TN、TP 均呈下降趋势,一周后 TN 浓度维持在 1.5~3.0 mg/L;随着水体中 TP、TN 浓度的增大,碱蓬的处理效果增加,且试验前后碱蓬植株体内 TP、TN 的含量也随水体中 TP、TN 浓度的增大而增加。随着净化时间的延长,不同程度富营养化水体中的 COD、BOD₅ 呈明显下降趋势。pH 值在不同程度富营养化水体中呈先降后升的趋势,修复 1 周后,各水体均呈弱碱性。由于盐生植物吸收一定的盐离子维持自身的营养需要,水体盐度表现出下降。试验表明,盐地碱蓬从内陆生境转移到海水生境后,不但适应了水生环境,也通过根系吸收、根际微生物等作用方式对水中的氮、磷、COD 等产生了良好的去除效果,盐地碱蓬修复海水养殖池塘水体具有良好潜力。

关键词:碱蓬;植物修复;海水养殖尾水;富营养化

中图分类号:Q178, X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)06-0081-05

随着中国海水养殖业的迅猛发展,沿海育苗场及养殖池塘尾水排放量与日俱增。由于养殖过程中投放的饲料仅有 9.1% 和 17.4% 被鱼类吸收,每年有近 3 亿 m³ 含有残饵、残骸、排泄物、化学药剂的养殖尾水排入附近海域,饵料含有大量的营养性物质(N 和 P 等),还通常添加抗生素等药物和微量元素 Zn、Cu 和 Fe 等(陈一波等,2016);再加上沿海开发、滩涂围垦、陆源污染、临港工业等,使海湾水域富营养化和重金属污染问题日趋严峻(杨佳等,2016;赵欣园等,2018),从而导致了近岸海域生态系统失衡、赤潮频发、病害滋生(杨宇峰等,2012)。既影响了水产品质量,也威胁到人类的健康。该问题已成为制约海水养殖健康持续发展的重要因素,严重破坏近岸海域的生态环境(王苏民等,1998)。

目前对于富营养化水体的修复手段主要分为三类,即物理修复、化学修复和生物修复。与物理、化学修复相比,生物修复具有不引入外来物质、运行成本低、处理操作简单、安全性较高等特点,是一项发

展潜力较大、环境友好的处理技术,广泛用于富营养化水体的修复(宋亚洲等,2009)。对于富营养化海水中,由于潜在污染物含量低、水量大,再加之海水的盐度效应和海水养殖尾水污染结构的特殊性,使其处理难度较大。许多修复性能良好的水生植物无法在含盐量高的水体中生长。因此,在修复海水时,盐生植物得到了普遍重视。岳晓彩等(2014)利用海马齿生态浮床修复海水养殖池塘,认为海马齿生态浮床原位修复技术能较好地改善海水养殖环境;而碱蓬(*Suaeda salsa*)作为盐生植物,其耐盐性强,且可较大程度上改善水体富营养化状况(杨佳等,2015);但其直接修复富营养化海水中的氮磷等营养盐还鲜见报道。本文以碱蓬为供试植物,利用水培方法对海水养殖废水进行原位修复,不仅缓解了养殖废水排入海洋而造成的富营养化,还实现了养殖业的可持续发展,是海水养殖尾水原位净化与循环利用的一种新途径。

1 材料与方法

1.1 试剂材料

所有试验试剂均为分析纯,购于国药集团试剂有限公司。碱蓬幼苗采集于慈溪庵东杭州湾湿地,选取生长良好,株高约 15 cm,株重约 2 g,共 100 株幼苗,洗净根部泥沙,放于冰盒中带回,然后置于海水(取自象山养殖基地)中培育 1 周,以适应水培条件。

收稿日期:2017-08-01 修回日期:2019-07-22

基金项目:宁波市自然科学基金项目(2018A610286);宁波市科技惠民项目(2017C50010);浙江省“生物工程”一流学科自设课题(ZS2019008);浙江万里学院引进人才重点项目(1741000530);国家级大学生创新创业训练计划项目(201810876047X)。

作者简介:王趁义,1964 年生,男,博士,教授,主要从事环境修复研究。E-mail:wcyyx@163.com

通信作者:滕丽华。E-mail:931792306@qq.com

1.2 试验设计

以海水原水为底水,以 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 、 NaNO_2 按比例溶解后,分别配制 4 种不同富营养化程度的水体,记作 I~IV 类水质(表 1)。用 NaOH 和 NaCl 将表 1 中的 5 种水体 pH 值和盐度调至相近,以减少其对试验结果的影响。装于 500 mL 有刻度的玻璃瓶中,每个处理设 3 个重复,以不放植物的空白做对照,每瓶放置 5 棵长势相近的碱蓬,每瓶的株重均为 10 g 左右,试验水温设定为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,通过曝气将每组的溶解氧维持在 $4.64 \sim 5.12 \text{ mg/L}$,然后用锡箔纸包裹外壁避光,自然光下培养。

采集水样前先用蒸馏水补齐蒸发的水,采集完后补充相应体积和浓度的水至刻度线。以周为单位测量水体的 pH、总氮(TN)、总磷(TP)、盐度、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD_5)。依据《GB17378.4-2007 海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》,分别采用 pH 计法测试 pH 值,五日培养法测试 BOD_5 ,碱性高锰酸钾法测试 COD,钼酸铵分光光度法测试 TP,过硫酸钾氧化法测试 TN,盐度计法测试盐度;植物中的总磷 TP 和总氮 TN 分别采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 法和凯氏定氮法测定。

1.3 数据处理

试验数据统计和处理采用 Excel 并作图。

表 1 人工配制海水水质指标

Tab.1 Water quality parameters for artificially formulated sea water for each treatment

组别	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	BOD_5 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	盐度
海水原水	4.35	0.45	750	16.50	7.35	31
I 类水	7.22	0.52	880	24.85	7.35	31
II 类水	9.45	0.96	910	24.85	7.35	31
III 类水	15.00	1.48	1065	16.50	7.35	31
IV 类水	20.00	1.95	1110	24.85	7.35	31

2 结果与分析

2.1 碱蓬对养殖尾水 TN 和 TP 的修复效果

如图 1 所示,碱蓬对水体中 TN 的修复效果较好,第 1 周 TN 就能达到一个较低水平,随后 3 周内 TN 的降低程度不大,基本维持在 $1.5 \sim 3.0 \text{ mg/L}$ 的范围内,可见水体的 TN 浓度越高,碱蓬对 TN 的去除效率越高。随净化时间的延长,TP 呈均匀下降的趋势,各组水体中 TP 下降的幅度相近(图 2)。

通过比较 5 组试验前后碱蓬中 TN 和 TP 浓度

之差(表 2),可得出四类水试验组中的单位质量碱蓬可吸收氮、磷的最大含量分别为 0.37 mg/g (TN)、 0.01 mg/g (TP);说明植物体内 TN 和 TP 等营养物质的含量较高时,净化水体中的 TN 和 TP 效率就高(高吉喜,1997);与 Li & Friedrich(2002)的研究结果一致,植物对 P 元素的去除取决于植物的生长速率及组织中的磷浓度。水生植物对 N、P 的去除主要是通过植物发达的根系及其根系微生物的吸附、萃取和生物同化作用实现的,与水体条件相关性不大,一般来说,同种植物对 N、P 的去除效果基本一致。

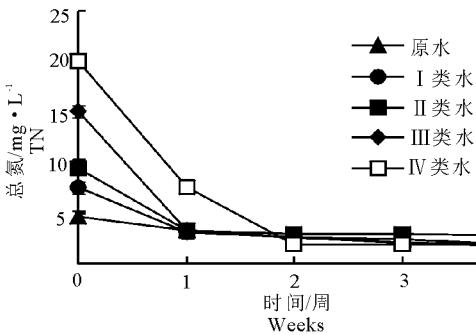


图 1 总氮随时间的变化

Fig.1 Change of TN concentration for each treatment

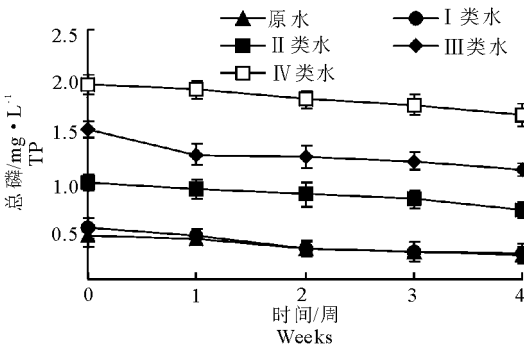


图 2 总磷随时间的变化

Fig. 2 Change of TP concentration for each treatment

表 2 试验前后碱蓬的总氮和总磷含量

Tab.2 TN and TP contents in *Suaeda salsa* before and after the five-week experiment

组别	碱蓬 TN 含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$		碱蓬 TP 含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	
	试验前	试验后	试验前	试验后
海水原水	4.56 ± 0.05^a	4.62 ± 0.08^b	0.348 ± 0.02^b	0.352 ± 0.01^b
I 类水	4.48 ± 0.06^b	4.59 ± 0.10^b	0.357 ± 0.04^a	0.362 ± 0.03^a
II 类水	4.43 ± 0.11^b	4.56 ± 0.09^b	0.344 ± 0.02^b	0.341 ± 0.01^b
III 类水	4.50 ± 0.07^a	4.78 ± 0.06^a	0.356 ± 0.03^a	0.363 ± 0.04^a
IV 类水	4.61 ± 0.08^a	4.98 ± 0.05^a	0.364 ± 0.03^a	0.374 ± 0.02^a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the level of 0.05.

2.2 碱蓬对 COD 和 BOD₅ 的修复效果

由图 3 可见,在碱蓬作用下,随净化时间的延长,不同程度富营养化水体中的 COD 总体表现为下降趋势。Ⅱ类、Ⅲ类和Ⅳ类水的 COD 下降程度相对明显,而水质较好的原水及Ⅰ类水体中的 COD 降低较慢,这是由于植物根际上附着的许多微生物及根际分泌的有机物造成需氧量增大的缘故。

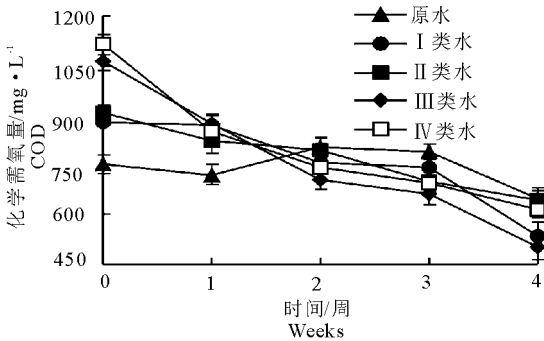


图 3 COD 随时间的变化

Fig.3 Change of COD concentration for each treatment

由图 4 可见,随着净化时间的延长,BOD₅ 呈明显下降趋势。在培养 4 周后,5 种水体中的 BOD₅ 含量相近并趋于平衡,表明碱蓬对 BOD₅ 的去除效果较好,主要原因是碱蓬根际微生物对 BOD₅ 有氧化分解作用。污水中的有机物是通过植物的根系吸收、吸附、植物根际和土壤基质中微生物的分解代谢作用最终被降解去除(Fried et al,1997);而在废水的处理过程中发挥关键作用的是根际微生物(吴刚等,2013)。这也佐证了废水中的 COD 和 BOD₅ 的去除主要是通过根际好氧微生物的降解作用。

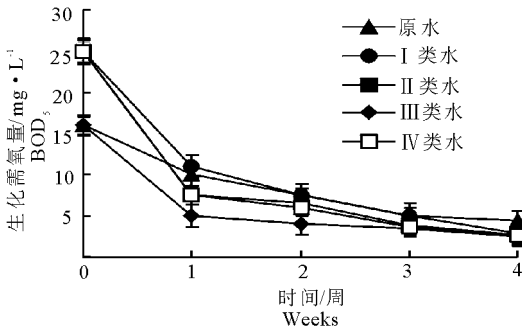


图 4 BOD₅ 随时间的变化

Fig.4 Change of BOD₅ concentration for each treatment

2.3 碱蓬对 pH 及盐度的影响

由图 5 可见,随着净化时间的延长,修复后不同程度富营养化水体的 pH 呈先降后升的趋势,修复 1 周后,各水体均呈弱碱性。由图 6 可知,水体中的盐度呈下降趋势;其中,由于Ⅳ类水质中的污染物较多,使其盐度下降较慢;而 pH 升高的原因可能是碱

蓬根际分泌了一些碱性物质,使水体环境呈碱性,适合碱蓬生长,同时盐生植物还会吸收一定的盐离子维持自身的营养需要,因此水体盐度有所下降。

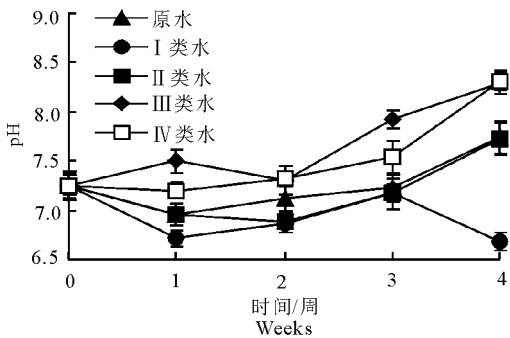


图 5 pH 随时间的变化

Fig.5 Change of pH for each treatment

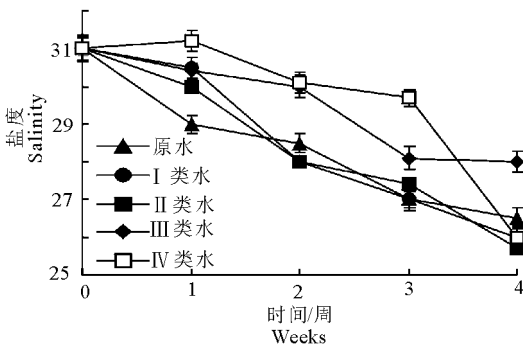


图 6 盐度随时间的变化

Fig.6 Change of salinity for each treatment

3 结论

(1)盐生植物碱蓬对富营养化海水养殖尾水具有较强的修复能力,特别是对 TN、BOD₅、盐度的去除效果最为明显,而对 TP 的去除效果相对较弱,修复后水体均偏弱碱性。

(2)对 N、P 的去除主要是通过植物发达的根系和根系微生物的吸附、萃取以及生物同化作用。

(3)植物体内 TN 和 TP 等营养物质的含量越高,表明其对水体 TN 和 TP 的净化除去效果越好。

参考文献

陈一波,宋国宝,赵文星,等,2016. 中国海水养殖污染负荷估算[J]. 海洋环境科学, 35(1):1-6.
高吉喜,叶春,杜娟,等,1997. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 17(3): 247-251.
宋亚洲,渠冲,刘忠华,2009. 生态修复技术在养殖池塘水处理中的应用[J]. 水产养殖, 30(7): 22-24.
王苏民,窦红身,1998. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社.
吴刚,彭瑾,廖明军,2013. 湿地根际微生物对人工湿地中

生活污水 COD 的去除效果[C]. 北京:中国环境科学学会.

杨佳, 李锡成, 王趁义, 等, 2015. 利用海蓬子和碱蓬修复滨海湿地污染研究进展[J]. 湿地科学, 13(4): 518 - 522.

杨佳, 王趁义, 陈翟, 等, 2016. 碱蓬对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 单一及复合胁迫的反应及其吸收累积特征[J]. 水土保持学报, 30(2): 323 - 327.

杨宇峰, 王庆, 聂湘平, 等, 2012. 海水养殖发展与渔业环境管理研究进展[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 33(5): 531 - 541.

岳晓彩, 饶科, 熊安安, 等, 2014. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘底栖动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 35(1): 22 - 27.

赵欣园, 于晓磊, 滕丽华, 等, 2018. 盐生植物修复海水养殖尾水的研究现状与进展[J]. 海洋环境科学, 37(3): 470 - 474.

Li W, Friedrich R, 2002. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted ploats: preliminary results from growth chamber experiment [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 90(1): 9 - 15.

Fried A, McKeen S, Sewell S, et al, 1997. Photochemistry of formaldehyde during the 1993 Tropospheric OH Photochemistry Experiment[J]. Journal of Eophysical Research, 102(5): 6283 - 6296.

(责任编辑 万月华)

Application of Halophyte *Suaeda salsa* in Remediation of Eutrophic Mariculture Tail Water

WANG Chen-yi, GUO Wei-chao, YANG Na, TENG Li-hua, ZHAO Xin-yuan, HU Jie

(College of Biology and Environment, University of Zhejiang Wanli, Ningbo 315100, P.R.China)

Abstract: The discharge of mariculture wastewater has led to serious ecological problems in coastal waters and restricted the sustainable and healthy development of mariculture. Halophytes, adapted to growing in saline conditions, have an obvious advantage for remediating mariculture wastewater. In this study, we investigated the growth of *Suaeda salsa*, transferred from inland habitat to seawater habitat, and its remediation effect on mariculture wastewater over a five-week period. Four synthetic eutrophic waters (Grade I–IV) were prepared by adding NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ and NaNO_2 at different ratios to seawater. The pH and salinity of the four solutions were adjusted to the same levels with NaOH and NaCl. Healthy *Suaeda salsa* (height: 15 cm, weight: 2 g) were acclimated in seawater for one week. Hydroponic cultures were then carried out in 500 mL glass bottles at $(25\pm2)^\circ\text{C}$ and dissolved oxygen of 4.64–5.12 mg/L. Each treatment was run in triplicate with five *Suaeda salsa* plants in each treatment, using seawater without plants as the control. Chemical oxygen demand (COD_{Mn}), five-day biochemical oxygen demand (BOD_5), total nitrogen (TN), total phosphorous (TP) were measured weekly in each treatment and the TP and TN content of plants were determined before and after the five week experiment. The content of TN and TP in each treatment decreased with time and, after one week, the concentration of TN was in the range 1.5–3.0 mg/L. Removal of TN and TP by *Suaeda salsa* increased with TP and TN concentration, as did the TP and TN content of *Suaeda salsa*. The COD and BOD_5 decreased markedly in all treatments. The pH initially decreased and then increased and, after one week, all treatments were weakly alkaline. The salinity for each treatment decreased due to absorption of salt by plants. Our results show that *Suaeda salsa* adapted well to the seawater environment and significantly reduced concentrations of nitrogen, phosphorus and COD. *Suaeda salsa* has great potential for treating water in mariculture ponds and provides a new method for in situ purification and recycling of mariculture wastewater.

Key words: *Suaeda salsa*; phytoremediation; mariculture tail waters; eutrophication