

# 碱蓬对不同盐度富营养化模拟海水的 净化效应及其生长特性

张 亚<sup>1</sup>, 常雅军<sup>1</sup>, 刘晓静<sup>1</sup>, 李乃伟<sup>1</sup>, 姚东瑞<sup>1,①</sup>, 吉红九<sup>2</sup>

(1. 江苏省中国科学院植物研究所 江苏省盐土生物资源研究重点实验室, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 研究了碱蓬 [*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge] 对不同盐度 (质量浓度 8、16 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl) 富营养化模拟海水中总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的净化效果, 并对碱蓬生长及其不同部位 TN 和 TP 的含量和积累量进行了研究。结果表明: 碱蓬在质量浓度 8、16 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中均生长良好。随处理时间的延长, 种植碱蓬后不同盐度富营养化模拟海水中 TN 和 TP 浓度均逐渐降低, TN 和 TP 去除率均逐渐升高, 其中在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中 TN 和 TP 去除率最高。处理 25 d, 在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中碱蓬单株鲜质量、单株干质量和株高的增量以及平均须根长均最大, 单株总干质量最高, 均显著高于其他 2 个处理组; 质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中碱蓬单株叶、茎和根中的 TN 和 TP 积累量明显高于其他 2 个处理组, 而单株种子中的 TN 和 TP 积累量则随着 NaCl 质量浓度提高而降低。研究结果显示: 作为在滨海盐渍化土壤中生长的一年生优势物种, 碱蓬可以有效地对有一定盐度的富营养化水体进行生物修复, 具有对滩涂养殖废水进行生物改良和修复的潜力。

**关键词:** 碱蓬; NaCl 处理; 富营养化模拟海水; 净化效果; 总氮和总磷积累量

**中图分类号:** S156.91; X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2016)04-0034-08

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.04.05

**Purification effect of *Suaeda glauca* on eutrophic simulated seawater with different salt concentrations and its growth character** ZHANG Ya<sup>1</sup>, CHANG Yajun<sup>1</sup>, LIU Xiaojing<sup>1</sup>, LI Naiwei<sup>1</sup>, YAO Dongrui<sup>1,①</sup>, JI Hongjiu<sup>2</sup> (1. Jiangsu Key Laboratory for Bioresources of Saline Soils, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Oceanology and Marine Fisheries, Jiangsu, Nantong 226007, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(4): 34-41

**Abstract:** Purification effect of *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge on total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations (mass concentration 8, 16 and 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl) was researched, and growth of *S. glauca* and contents and accumulations of TN and TP in its different parts were also studied. The results show that *S. glauca* grows well in eutrophic simulated seawater with mass concentration 8, 16 and 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl. With prolonging of treatment time, concentrations of TN and TP in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations after planting *S. glauca* decrease gradually, removal rates of TN and TP increase gradually, in which, removal rates of TN and TP in eutrophic simulated seawater with mass concentration 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl are the highest. Treating for 25 d, in eutrophic simulated seawater with mass concentration 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl, increments of fresh weight per plant, dry weight per plant and plant height, and average length of fibre of *S. glauca* are the largest, total dry weight per plant is the highest, and all are significantly higher than those of other two treatment groups; accumulations of TN and TP in leaf, stem and root per plant of *S. glauca* in eutrophic simulated seawater with mass concentration 16

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 江苏省水产三新工程项目 (Y2015-40); 江苏省科学技术厅现代农业研究开发示范类项目 (BE2015323); 江苏省盐土生物资源研究重点实验室项目 (YT2014-02)

作者简介: 张 亚 (1991—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事盐土植物对滩涂富营养化水体修复治理方面的研究。

①通信作者 E-mail: shuishengzu@126.com

$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl are obviously higher than those of other two treatment groups, while those in seed per plant decrease with enhancing of NaCl mass concentration. It is suggested that as annual dominant species growing in coastal saline soil, *S. glauca* can be used for bioremediation of eutrophic water with a certain salinity, and has potential of biological improvement and remediation of tidal flat aquaculture wastewater.

**Key words:** *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge; NaCl treatment; eutrophic simulated seawater; purification effect; accumulations of total nitrogen and total phosphorus

近年来,随着人们对海产品需求量的不断增加,滩涂海水养殖成为提高全球水产品供给量的主要水产养殖方式之一<sup>[1]</sup>。滩涂海水养殖缓解了海水捕捞给海洋生物可持续发展带来的巨大压力,在海洋渔业生产中的比重持续增加,其地位和重要性也越来越显著<sup>[2]</sup>。但由于滩涂养殖的生态结构单一、养殖方式粗放<sup>[3]</sup>,加之养殖尾水和废水未经处理任意排放,造成滩涂水体和近海域水体中氮和磷浓度持续增高,引起滩涂水环境恶化、富营养化程度加剧<sup>[4-6]</sup>。

滩涂养殖尾水富营养化的治理和修复一般包括物理、化学和生物等处理方法<sup>[7-8]</sup>,物理和化学处理方法具有费用高和可能带来二次污染<sup>[9-10]</sup>等问题,而生物处理方法具有良好的生态效益、社会效益和经济效益,已逐渐成为最有应用潜力的水体修复技术<sup>[11-12]</sup>。植物修复是一种以植物为主体的生物治理法,通过利用植物的同化、降解和代谢等过程来减少环境中的污染物<sup>[13-14]</sup>。一般认为植物通过根系的吸收、吸附、截留和富集等作用将氮和磷等营养物质带离水体,从而改善水质、美化环境、恢复原有生态系统<sup>[15-17]</sup>。根据生态学原理,在建立植物修复系统的过程中,应选择当地的植物种类,可保持修复系统的生态稳定性<sup>[18]</sup>。碱蓬[*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge]为藜科(Chenopodiaceae)碱蓬属(*Suaeda* Forsk. ex Scop.)一年生草本植物,其株高可达1 m、叶片肉质化,主要生长于湖边、荒漠和滨海等处的盐碱荒地,是典型的盐碱地指示植物<sup>[19]</sup>;此外,碱蓬还可在海水中生长,并含有普通蔬菜所具有的各类营养成分,因而,该种具有重要的生态价值和潜在的经济价值,已成为国内外耐盐植物的育种材料和驯化对象<sup>[20]</sup>。

作者所在课题组前期已对江苏南通地区沿海滩涂养殖水体的盐度及总氮(TN)和总磷(TP)浓度进行了实地检测,在此基础上,以南通当地常见的耐盐植物碱蓬为研究对象,通过人工配制海水模拟滩涂水体盐度和富营养化程度,分析了碱蓬对不同盐度富营养化模拟海水中氮、磷的吸收和净化效果;结合碱蓬各

器官干质量的分配特征和植株的生长量以及植株不同部位的TN和TP含量和积累量,探究碱蓬对滩涂富营养化水体的修复效应,以期为碱蓬属植物资源的开发和利用以及沿海滩涂水体生态环境的植物修复提供基础研究数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试碱蓬取自南通市郊区沿海滩涂,地理坐标为北纬 $32^{\circ}20'$ 、东经 $120^{\circ}57'$ 。选取株高基本一致且根、茎和叶完整的植株,用去离子水冲洗干净,去除杂质和附着生物等,用海绵固定于有孔的2 cm厚泡沫板载体上,每块泡沫板定植9株碱蓬,将泡沫板置于长536 mm、宽390 mm、高148 mm的塑料水培箱中。实验用模拟海水的理化指标按照南通沿海养殖基地水样的数值配置,总氮(TN)浓度为 $2.44 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 $0.04$ 和 $2.40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;总磷(TP)、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度分别为 $0.05$ 、 $1.91$ 、 $0.25$ 和 $0.21 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{BO}_3^{3-}$ 、 $\text{MoO}_4^{2-}$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 浓度分别为 $0.6$ 、 $0.787$ 、 $0.9$ 、 $23.8$ 、 $4.4$ 和 $5.89 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设置和处理方法 模拟海水的盐度分别设置低浓度(质量浓度 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl)、中浓度(模拟当地滩涂养殖水体盐度,质量浓度 $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl)和高浓度(质量浓度 $24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl)3级;对照(CK)为未添加NaCl的模拟海水,且未种植碱蓬。共4组处理,每处理组设4次重复。

实验于2015年9月上旬在南京中山植物园的通风玻璃房(北纬 $32^{\circ}07'$ 、东经 $118^{\circ}48'$ )内进行。将模拟海水分别加入水培箱中,根据上述实验设置,每天添加一定量NaCl至模拟海水中使NaCl质量浓度每天增加 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,直至所有处理组的模拟海水中NaCl质量浓度达到实验设置的要求;以此为处理起始点,

于处理的0、5、10、15、20和25 d分别采集各处理组的水样20 mL(取水样之前将水体混合均匀),用于水体TN和TP浓度测定;分别于处理开始时(处理0 d)和处理结束时(处理25 d)采集各处理组的碱蓬植株,用于植株生长量及TN和TP含量的测定。

1.2.2 水体中TN和TP浓度的测定方法 参照GB 11894—1989中的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水体中TN浓度,参照GB 11893—1989中的钼酸铵分光光度法测定水体中TP浓度。根据公式“ $W_i = [(C_0 - C_i) / C_0] \times 100\%$ ”<sup>[21]</sup>计算水体中TN(或TP)去除率。式中, $C_0$ 为水体中初始TN(或TP)浓度; $C_i$ 为第*i*天时水体中TN(或TP)浓度。

1.2.3 植株生长量的测定方法 在各处理组中分别取6株单株,依次用自来水和去离子水冲洗干净,吸干表面水分,用AR1140型电子天平(上海台衡仪器仪表有限公司,精度0.0001g)称取单株鲜质量;将各碱蓬单株分为根、茎、叶和种子4部分,于105℃杀青2h,然后于70℃烘干至恒质量,分别称取各部分干质量。随后,将各部位干样研磨并过60目筛,备用。每个处理组随机收集6株单株,分别用刻度尺(精度1mm)测量各单株茎下端至最高枝叶处的长度,即为株高;将根系放平后用刻度尺(精度为1mm)测量根系中所有须根的长度,并统计单株的须根数量。

按照公式“单株鲜(干)质量增量=处理结束时单株鲜(干)质量-处理开始时单株鲜(干)质量”计算处理结束时(处理25 d)碱蓬的单株鲜质量(或干质量)的增量;按照公式“株高增量=处理结束时株高-处理开始时株高”计算处理结束时植株的株高增量;按照公式“平均须根长=须根总长/须根总数”<sup>[22]</sup>计算平均须根长。

1.2.4 植株中TN和TP含量和积累量的测定方法 参照文献[23]测定植株不同部位TN含量。分别称取上述根、茎、叶和种子粉末样品0.4g,用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法进行消解并定容至100mL,采用凯氏定氮法并用SKD-800凯氏定氮仪(上海沛欧分析仪器有限公司)测定TN含量。取上述消解液10mL,采用Optima 4300DV电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)(美国PerkinElmer公司)测定TP含量。按照“单株TN积累量=TN含量×单株根(或茎、叶、种子)的干质量”计算单株不同部位的TN积累量;按照“单株TP积累量=TP含量×单株根(或茎、叶、种子)的干质量”计算单株不同部位的TP积累量。

### 1.3 数据处理

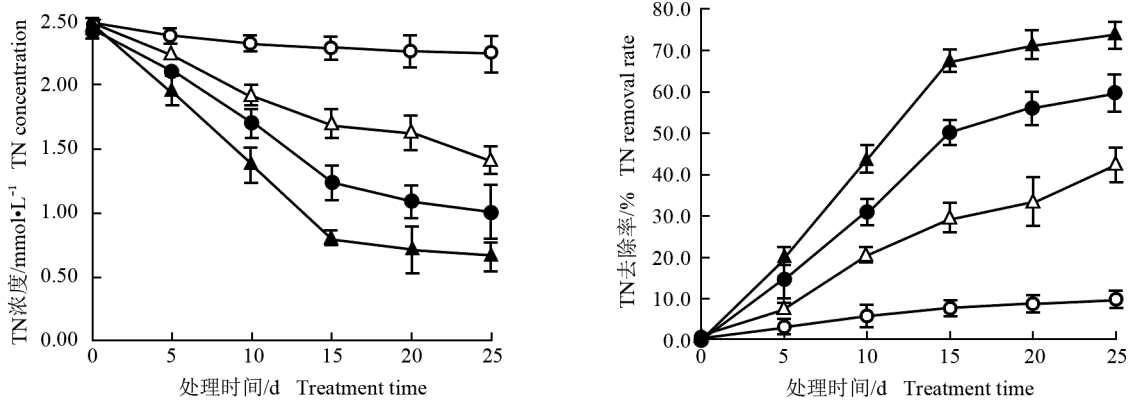
采用EXCEL 2016和SPSS 16.0统计分析软件对数据进行统计和差异显著性分析(Duncan's新复极差法),置信区间为5%。

## 2 结果和分析

### 2.1 碱蓬对不同盐度富营养化模拟海水的净化效应分析

2.1.1 对总氮(TN)浓度和TN去除率的影响 种植碱蓬后不同盐度富营养化模拟海水中TN浓度及TN去除率的变化见图1。由图1可见:在不同质量浓度NaCl富营养化模拟海水中,随处理时间延长,TN浓度均逐渐降低,而TN去除率则逐渐升高,且均与对照(无NaCl的模拟海水且未种植碱蓬)有显著差异( $P < 0.05$ )。处理25 d,在质量浓度 $16 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TN浓度降幅最大,由初始的 $2.440 mmol \cdot L^{-1}$ 下降至 $0.653 mmol \cdot L^{-1}$ ,TN去除率达73.24%;在质量浓度 $8 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TN浓度下降至 $1.000 mmol \cdot L^{-1}$ ,TN去除率为59.02%;在质量浓度 $24 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TN浓度下降至 $1.401 mmol \cdot L^{-1}$ ,TN去除率为42.58%。此外,处理5 d后,各处理组的TN浓度和去除率均有显著差异。说明碱蓬对不同盐度富营养化模拟海水中的TN具有良好的吸收和净化效果,其中对质量浓度 $16 g \cdot L^{-1}$  NaCl(模拟当地滩涂养殖水体盐度)的富营养化模拟海水中TN的净化效果最好。

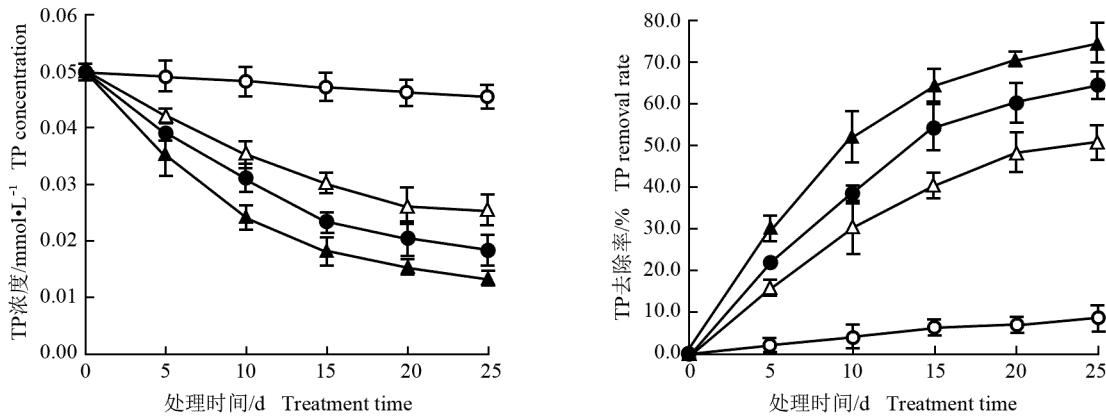
2.1.2 对总磷(TP)浓度和TP去除率的影响 种植碱蓬后不同盐度富营养化模拟海水中TP浓度及TP去除率的变化见图2。由图2可见:在不同质量浓度NaCl富营养化模拟海水中,随处理时间延长,TP浓度逐渐降低,而TP去除率则逐渐升高,且均与对照有差异显著( $P < 0.05$ )。处理25 d,在质量浓度 $16 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TP浓度由初始的 $0.050 mmol \cdot L^{-1}$ 降至 $0.017 mmol \cdot L^{-1}$ ,TP去除率为66.00%;在质量浓度 $24 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TP浓度降至 $0.025 mmol \cdot L^{-1}$ ,TP去除率为50.00%;在质量浓度 $16 g \cdot L^{-1}$  NaCl富营养化模拟海水中,TP浓度降至 $0.013 mmol \cdot L^{-1}$ ,降幅最大,且TP去除率达到74.00%。此外,处理5 d后,各处理组的TP浓度和TP去除率均有显著差异。说明碱蓬对不



—●—: 质量浓度 8 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 8 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —▲—: 质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —△—: 质量浓度 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —○—: 无 NaCl 的模拟海水且未种植碱蓬(对照) Simulated seawater without NaCl and unplanted *S. glauca* (the control).

图 1 种植碱蓬后不同盐度富营养化模拟海水中总氮 (TN) 浓度和 TN 去除率的动态变化

Fig. 1 Dynamic change in total nitrogen (TN) concentration and TN removal rate of eutrophic simulated seawater with different salt concentrations after planting *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge



—●—: 质量浓度 8 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 8 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —▲—: 质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —△—: 质量浓度 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 的模拟海水并种植碱蓬 Simulated seawater with mass concentration 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl and planting *S. glauca*; —○—: 无 NaCl 的模拟海水且未种植碱蓬(对照) Simulated seawater without NaCl and unplanted *S. glauca* (the control).

图 2 种植碱蓬后不同盐度富营养化模拟海水中总磷 (TP) 浓度和 TP 去除率的动态变化

Fig. 2 Dynamic change in total phosphorus (TP) concentration and TP removal rate of eutrophic simulated seawater with different salt concentrations after planting *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge

同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中的 TP 有较强的吸收和净化效果,尤其对质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl (模拟当地滩涂养殖水体盐度)富营养化模拟海水中 TP 的吸收和净化效果最好。

## 2.2 在不同盐度富营养化模拟海水中碱蓬生长指标的比较分析

2.2.1 单株质量和株高的增量以及平均须根长的比较 在不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中处理 25 d,碱蓬的单株鲜质量、单株干质量和株高 3 个指标

的增量以及平均须根长见表 1。由表 1 可见:处理 25 d,在质量浓度 8、16 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中,碱蓬的单株鲜质量、单株干质量、根长和株高均不同程度增加,单株鲜质量、单株干质量和株高的增量分别为 10.91 ~ 50.97 g、1.39 ~ 4.11 g 和 0.9 ~ 2.8 cm,平均须根长为 8.7 ~ 19.4 cm,且各指标的增量在各处理组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。其中,在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中,碱蓬的单株鲜质量、单株干质量和株高的增量以及平均须



表 1 在不同盐度富营养化模拟海水中碱蓬的单株鲜质量、单株干质量和株高的增量以及平均须根长的比较 ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 1 Comparison on increments of fresh weight per plant, dry weight per plant and plant height, and average length of fibre of *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

盐度 Salt concentration	单株鲜质量增量/g Increment of fresh weight per plant	单株干质量增量/g Increment of dry weight per plant	株高增量/cm Increment of plant height	平均须根长/cm Average length of fibre
8 g · L <sup>-1</sup> NaCl	32.13±4.53b	2.59±0.97b	1.5±0.3b	15.1±1.2b
16 g · L <sup>-1</sup> NaCl	50.97±5.94a	4.11±1.27a	2.8±0.7a	19.4±1.7a
24 g · L <sup>-1</sup> NaCl	10.91±1.70c	1.39±0.68c	0.9±0.2c	8.7±0.3c

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

根长均最大, 分别达到 50.97 g、4.11 g、2.8 cm 和 19.4 cm, 显著高于另 2 个处理组。说明在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl (模拟当地滩涂养殖水体盐度) 的富营养化模拟海水中碱蓬的长势最好。

2.2.2 单株不同部位干质量的比较 在不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中处理 25 d, 碱蓬单株不同部位的干质量见表 2。由表 2 可见: 在质量浓度 8 和 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中, 碱蓬单株茎干质量和种子干质量均高于质量浓度 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组和对照 (处理前), 其中, 前 2 组的单株茎干质量与后 2 组差异显著 ( $P < 0.05$ ); 在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中, 碱蓬单株叶、根和总干质量均高于对照及另 2 个处理组, 其中, 单株叶干质量和总干质量与对照及另 2 个处理组差异显著; 各处理组单株种子干质量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。总体上看,

在质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl (模拟当地滩涂养殖水体盐度) 富营养化模拟海水中碱蓬单株叶干质量和总干质量均最高, 生长最好, NaCl 浓度过高或过低均会影响其生长发育; 在该条件下生长的碱蓬可将富营养化模拟海水中的营养有效转移到光合作用器官中, 进而促进单株总干质量的增加。碱蓬不同部位单株干质量由高到低依次排序为叶、茎、种子、根, 这可能与植株不同部位的生长和干物质积累特性有关。

由表 2 还可见: 在不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中, 各处理组单株水上部干质量占单株总干质量的百分率 ( $P_A$ ) 均高于对照, 单株水下部干质量占单株总干质量的百分率 ( $P_U$ ) 均低于对照, 但均无显著差异; 此外, 碱蓬的  $P_A$  均高于  $P_U$ , 表明碱蓬水上部器官是其干物质积累的主要部位。

表 2 在不同盐度富营养化模拟海水中碱蓬单株不同部位干质量的比较 ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 2 Comparison on dry weight of different parts per plant of *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

盐度 Salt concentration	单株不同部位的干质量/g Dry weight of different parts per plant				单株总干质量/g Total dry weight per plant	$P_A/\%$ <sup>4)</sup>	$P_U/\%$ <sup>5)</sup>
	叶 Leaf	种子 Seed	茎 Stem	根 Root			
对照 <sup>2)</sup> The control <sup>2)</sup>	3.60±0.38b	— <sup>3)</sup>	2.23±0.11b	1.21±0.24a	7.05±0.18d	82.69±3.91a	17.31±3.91a
8 g · L <sup>-1</sup> NaCl	3.35±0.10b	2.35±0.39a	2.67±0.14a	1.23±0.08a	9.64±0.51b	86.88±0.97a	13.12±0.97a
16 g · L <sup>-1</sup> NaCl	4.52±0.20a	2.16±0.29a	2.88±0.08a	1.60±0.09a	11.16±0.08a	85.64±0.90a	14.36±0.90a
24 g · L <sup>-1</sup> NaCl	3.64±0.10b	1.50±0.28a	2.26±0.05b	1.12±0.08a	8.46±0.19c	86.76±1.21a	13.24±1.21a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> 处理前 Before treatment.

<sup>3)</sup> —: 未结种 No setting seed.

<sup>4)</sup>  $P_A$ : 单株水上部干质量占单株总干质量的百分率 Percentage of dry weight of above-water part per plant to total dry weight per plant.

<sup>5)</sup>  $P_U$ : 单株水下部干质量占单株总干质量的百分率 Percentage of dry weight of under-water part per plant to total dry weight per plant.

## 2.3 在不同盐度富营养化模拟海水中碱蓬不同部位总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的含量和积累量的比较

2.3.1 对 TN 和 TP 含量的比较 在不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中, 碱蓬叶、种子、茎和根中 TN 和 TP 的含量见表 3。由表 3 可见: 与对照 (处理前) 相比, 处理 25 d, 各处理组的碱蓬叶和茎中 TN 和 TP

含量均明显降低, 其中, 各处理组叶中 TN 和 TP 含量以及茎中 TN 含量均与对照有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 质量浓度 8 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组茎中 TP 含量也与对照差异显著; 而根中 TN 和 TP 含量则均显著高于对照。此外, 在 3 个处理组中, 在质量浓度 8 和 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中, 碱蓬种子中 TN 和 TP

表3 在不同盐度富营养化模拟海水中碱蓬不同部位总氮(TN)和总磷(TP)含量的比较( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 3 Comparison on contents of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in different parts of *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

盐度 Salt concentration	不同部位 TN 含量/mg · g <sup>-1</sup> TN content in different parts				不同部位 TP 含量/mg · g <sup>-1</sup> TP content in different parts			
	叶 Leaf	种子 Seed	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	种子 Seed	茎 Stem	根 Root
对照 <sup>2)</sup> The control <sup>2)</sup>	14.20±0.22a	— <sup>3)</sup>	7.84±0.82a	5.93±1.12b	2.55±0.36a	— <sup>3)</sup>	1.81±0.26a	1.32±0.12c
8 g · L <sup>-1</sup> NaCl	10.07±0.92b	15.38±0.71a	7.07±0.70a	14.70±0.46a	1.60±0.02b	2.41±0.05a	0.93±0.13b	1.97±0.05a
16 g · L <sup>-1</sup> NaCl	9.23±0.43b	13.95±0.03ab	7.40±0.21a	16.82±0.44a	1.59±0.21b	2.50±0.04a	1.34±0.12ab	1.72±0.06ab
24 g · L <sup>-1</sup> NaCl	8.40±0.40b	12.55±0.82b	7.30±0.21a	14.47±1.23a	0.92±0.02b	1.95±0.13b	1.02±0.09b	1.50±0.06bc

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> 处理前 Before treatment.

<sup>3)</sup> —: 未结种 No setting seed.

含量均高于质量浓度 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组。

2.3.2 TN 和 TP 积累量的比较 在不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水中,碱蓬单株叶、种子、茎和根中 TN 和 TP 的积累量见表 4。由表 4 可见:与对照(处理前)相比,处理 25 d,各处理组碱蓬单株叶中的 TN 和 TP 积累量均不同程度降低,其中,质量浓度 8 和 24 g · L<sup>-1</sup> 处理组的碱蓬单株叶中 TN 和 TP 积累量均与对照有显著差异( $P<0.05$ )。各处理组碱蓬单株茎中 TN 积累量及质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组碱蓬单株茎中 TP 积累量均与对照无显著差异( $P>0.05$ ),而

质量浓度 8 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组碱蓬单株茎中 TP 积累量显著低于对照。各处理组碱蓬单株根中 TN 和 TP 积累量均高于对照,且各处理组碱蓬单株根中 TN 积累量以及质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组碱蓬单株根中 TP 积累量均与对照差异显著;其中,质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组碱蓬单株根中 TN 和 TP 积累量最高。此外,质量浓度 8 和 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组碱蓬单株种子中 TN 和 TP 积累量均显著高于质量浓度 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组,但前 2 个处理组间碱蓬单株种子中 TN 和 TP 积累量无显著差异。

表4 在不同盐富营养化模拟海水中碱蓬单株不同部位总氮(TN)和总磷(TP)积累量的比较( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 4 Comparison on accumulations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in different parts per plant of *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in eutrophic simulated seawater with different salt concentrations ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

盐度 Salt concentration	单株不同部位 TN 积累量/mg TN accumulation in different parts per plant				单株不同部位 TP 积累量/mg TP accumulation in different parts per plant			
	叶 Leaf	种子 Seed	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	种子 Seed	茎 Stem	根 Root
对照 <sup>2)</sup> The control <sup>2)</sup>	51.22±5.27a	— <sup>3)</sup>	17.63±2.39a	6.74±0.99c	9.22±1.69a	— <sup>3)</sup>	3.99±0.42a	1.63±0.40b
8 g · L <sup>-1</sup> NaCl	33.58±2.18bc	36.69±7.68a	18.72±0.90a	18.54±0.60b	5.37±0.10b	5.63±0.85a	2.46±0.22b	2.50±0.21ab
16 g · L <sup>-1</sup> NaCl	41.56±0.68ab	30.08±3.96a	21.36±1.20a	26.96±1.92a	7.11±0.71ab	5.43±0.80a	3.88±0.44a	2.76±0.24a
24 g · L <sup>-1</sup> NaCl	30.05±1.51c	18.35±2.26b	16.75±0.69a	15.94±0.26b	3.27±0.10b	2.98±0.67b	2.33±0.25b	1.69±0.18b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

<sup>2)</sup> 处理前 Before treatment.

<sup>3)</sup> —: 未结种 No setting seed.

### 3 讨论和结论

上述研究结果表明,碱蓬对质量浓度 8、16 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中的总氮(TN)和总磷(TP)均有明显的去除效果,并且随处理时间的延长模拟海水中 TN 和 TP 浓度明显下降,但不同质量浓度 NaCl 处理组对 TN 和 TP 的去除效应存在差异,其中质量浓度 16 g · L<sup>-1</sup> 富营养化模拟海水中碱蓬对 TN

和 TP 的去除效应最好,且与质量浓度 8 和 16 g · L<sup>-1</sup> NaCl 处理组存在明显差异。说明碱蓬作为一种稀盐盐生植物,虽然在其生长过程中需要一定的盐,但盐浓度过高或过低都会影响其植株生长,进而影响其对水体中富营养化物质的吸收<sup>[24]</sup>。本研究中,质量浓度 8、16 和 24 g · L<sup>-1</sup> NaCl 富营养化模拟海水中 TN 和 TP 浓度均表现为先迅速降低后降幅趋于平缓的变化趋势。这是因为植物移栽后,经过短暂的恢复期,在随后的生长过程中会快速吸收 N 和 P,这时水体中的

TN 和 TP 浓度迅速降低;到了实验后期,由于植物本身对营养元素需求的减少以及植物体内 N 和 P 元素的再分配,使得植物吸收利用水体中 N 和 P 元素的速度减慢,从而导致水体中 TN 和 TP 浓度的降幅也随之减缓<sup>[25]</sup>。

本研究中,质量浓度  $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 富营养化模拟海水中碱蓬单株鲜质量、单株干质量、平均须根长和株高显著高于质量浓度 8 和  $24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组,说明植物生长指标的增量是决定植物净化水体效果的一个重要因素<sup>[26]</sup>。本研究中,质量浓度 8、16 和  $24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 富营养化模拟海水中碱蓬单株水上部干质量占单株总干质量的比值均在 85% 以上,说明碱蓬适合通过收割方式将植株同化的营养物质带离水体<sup>[27]</sup>。同时,由于碱蓬还可作为一种优质的蛋白饲料<sup>[28]</sup>,因而,在富营养化水体中种植碱蓬,既可修复治理水体富营养化,又能作为饲料蛋白源,实现了环境效益与经济效益的良性结合。

研究结果显示:不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水碱蓬根和种子中 TN 和 TP 含量均高于茎和叶中 TN 和 TP 含量,表现出碱蓬吸收的 N 和 P 向根和种子富集的趋势。且不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水碱蓬单株叶、茎和根中 TN 和 TP 积累量由高到低依次为质量浓度  $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组、质量浓度  $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组、质量浓度  $24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组,说明质量浓度  $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组更有利于碱蓬吸收富营养化模拟海水中的 N 和 P,也有利于 N 和 P 从根部向上运输,并在种子中积累<sup>[25]</sup>。本研究中,碱蓬单株水上部(叶、种子和茎)的 TN 和 TP 积累量明显高于单株水下部(根),表明碱蓬吸收富营养化模拟海水中的 N 和 P 主要转移到水上部<sup>[29-30]</sup>。本研究中,3 种不同质量浓度 NaCl 富营养化模拟海水碱蓬单株叶中 TN 和 TP 积累量均较处理前有不同程度的降低。蒋跃平等<sup>[31]</sup>对植物中 N 和 P 吸收总量与生物量间相关性的研究认为,叶中的 N 和 P 含量随着植物对 N 和 P 的吸收总量上升而增加,与本研究结果存在差异,这可能与本研究中碱蓬由营养生长过渡到了生殖生长有关,由于实验过程中碱蓬种子的产生,且单株种子和叶中 TN 和 TP 积累量之和远大于茎和根,表明在实验过程中,碱蓬吸收的 N 和 P 向种子发生了转移,导致碱蓬单株叶中的 TN 和 TP 积累量降低。

综合分析结果表明:碱蓬在质量浓度  $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 富营养化模拟海水中的长势最好,对 TN 和 TP

的吸附效应最显著。由此可见,碱蓬作为在滨海盐渍化土壤中生长的一年生优势物种,可人工水培于盐度接近质量浓度  $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 的滨海滩涂的富营养化水体中,对大面积的水产养殖废水进行生物改良和修复,进而达到改善和保护近岸水域生态系统的目的。

#### 参考文献:

- [1] 舒廷飞, 罗琳, 温琰茂. 海水养殖对近岸生态环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 74-79.
- [2] 苏艺, 刘佳, 韩晓庆, 等. 海水养殖对海洋生态环境的影响: 以河北省昌黎县为例[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 306-309.
- [3] 宇文青. 海水养殖对海洋环境影响的探讨[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(12): 113-117.
- [4] 马经安, 李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578.
- [5] 姜晟, 李俊龙, 李旭文, 等. 江苏近岸海域富营养化现状评价与成因分析[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(4): 26-29.
- [6] 尹艳娥, 沈新强, 蒋玫, 等. 长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 622-629.
- [7] 宋志文, 王玮, 赵丙辰, 等. 海水养殖废水的生物处理技术研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 13-17.
- [8] 方圣琼, 胡雪峰, 巫和听, 等. 水产养殖废水处理技术及应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(9): 51-55.
- [9] 黎明, 刘德启, 沈颂东, 等. 国内富营养化湖泊生态修复技术研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 374-376, 394.
- [10] 霍志久, 张志华, 朱永涛, 等. 富营养化水体修复技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2015(20): 167, 182.
- [11] 宋关玲. 生物修复技术在水体富营养化治理中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8597-8598.
- [12] 马井泉, 周怀东, 董哲仁. 我国应用生态技术修复富营养化湖泊的研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 209-215.
- [13] CHERRY J A, GOUGH L. Temporary floating island formation maintains wetland plant species richness: the role of the seed bank[J]. Aquatic Botany, 2006, 85: 29-36.
- [14] ZHANG X B, LIU P, YANG Y S, et al. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19: 902-909.
- [15] 杜少文. 湿地植物污水净化效果及其机理的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学海洋生命学院, 2011: 9-11.
- [16] KANSIME F, ORYEM-ORIGA H, RUKWAGO S. Comparative assessment of the value of papyrus and cocoyams for the restoration of the Nakivubo wetland in Kampala, Uganda[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30: 698-705.
- [17] MAHUJCHARIYAWONG J, IKEDA S. Modelling of environmental phytoremediation in eutrophic river: the case of water hyacinth harvest in Tha-chin River, Thailand[J]. Ecological Modelling,

- 2001, 142: 121-134.
- [18] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6): 690-692.
- [19] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第二十五卷第二分册[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 118.
- [20] 赵可夫, 李法曾, 樊守金, 等. 中国的盐生植物[J]. 植物学通报, 1999, 16(3): 201-207.
- [21] 刘晓丹, 李军, 龚一富, 等. 5种水培植物对富营养化水体的净化能力[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7): 2607-2612.
- [22] 黄燕湘, 罗丽华, 何静. 不同类型水稻根系形态特性实验方法的比较与分析[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(7): 24-26.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 195-198.
- [24] 弋良朋, 王祖伟. 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1195-1202.
- [25] 张熙灵, 王立新, 刘华民, 等. 芦苇和藎草对不同程度富营养化水体的净化效果研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(2): 11-16.
- [26] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1571-1575.
- [27] ZHU L, LI Z, KETOLA T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area[J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 1460-1466.
- [28] 张学杰, 樊守金, 李法曾. 中国碱蓬资源的开发利用研究状况[J]. 中国野生植物资源, 2003, 22(2): 1-3.
- [29] 李建娜, 胡日利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(7): 506-509.
- [30] 张志勇, 王建国, 杨林章, 等. 植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究[J]. 土壤, 2008, 40(3): 412-419.
- [31] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.

(责任编辑: 张明霞)

## 2017年《生物质化学工程》征订启事

《生物质化学工程》(双月刊)是由国家林业局主管、中国林业科学研究院林产化学工业研究所主办,面向国内外公开发行的全国生物质化工行业的技术类刊物。被美国《化学文摘》(CA)和《乌利希国际期刊指南》收录,为北大中文核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)和中国农业核心期刊,也是中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、万方数据——数字化期刊群、CEPS中文电子期刊服务的全文收录期刊,并为中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊和《CAJ-CD规范》执行优秀期刊。

报道范围:可再生的木质和非木质生物质资源的化学加工与利用,包括生物质能源、生物质化学品、生物质新材料、生物质天然活性成分和制浆造纸等。主要报道内容:松脂化学、生物质能源化学、生物质炭材料、生物基功能高分子材料、胶黏剂化学、森林植物资源提取物化学利用、环境保护工程、木

材制浆造纸为主的林纸一体化和林产化学工程设备研究设计等方面的最新研究成果。主要栏目:研究报告、综述评论、行业热点、国内外信息等。读者对象:从事生物质化学工业、林产化学工业、林业、农业、森工、能源、轻工、化工、环保、医药、食品、土产、商检、外贸等行业从事科研、教学、生产、经营、设计等工作的相关人士。

双月刊, A4开本, 56页, 单月月底出版;国内统一连续出版物号 CN 32-1768/S, 国际标准连续出版物号 ISSN 1673-5854。全国各地邮局发行, 国内邮发代号 28-205, 每册定价 10.00元, 国内全年订价 60.00元;国外发行代号 BM 2743, 国外全年定价 60.00美元。地址:江苏省南京市锁金五村 16号林化所内(邮编 210042);电话:025-85482492, 85482492(传真);网址: <http://www.bce.ac.cn>; E-mail: [bce@vip.163.com](mailto:bce@vip.163.com)。

欢迎投稿、订阅或来电来函联系广告业务!