盐地碱蓬浮床对海水养殖水体原位修复的效果

滕丽华[1], 赵欣园[1], 王趁义[1], 郭炜超[1], 李 洋[2], 汤唯唯[1]

(1. 浙江万里学院 生物与环境学院, 浙江 宁波 315100; 2. 宁波晟乾环境技术开发有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘 要: [目的] 研究盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)由陆地生境转移到浮床盐水生环境后的生长情况及其对海水养殖池塘水体原位修复的效果,为利用盐生植物原位修复海水养殖池塘提供方法。[方法] 测定修复期间盐水浮床和陆地两种生境下盐地碱蓬的生长及生理生化指标,并监测海水养殖池塘水体水质。[结果] 试验期内浮床生境中盐地碱蓬适应良好,生物量显著增加,其中浮床生境盐地碱蓬根系活力、叶片含氮量分别显著高于同期陆地生境中的盐地碱蓬。水质检测表明,修复后浮床区水体中总氮、总磷、氨氮和化学需氧量分别为 3.34,0.20,0.47,0.35 mg/L,均明显低于对照区,去除效果良好。[结论] 盐地碱蓬从陆地生境转移到浮床盐水生境后可以适应水生环境,并通过根系吸收部分去除水中的氮、磷等污染元素。盐地碱蓬原位修复海水养殖池塘水体具有较好的潜力。

关键词: 碱蓬浮床; 生长特性; 海水养殖用水; 原位修复

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)03-0217-05 **中图分类号**: X55

文献参数: 滕丽华, 赵欣园, 王趁义, 等. 盐地碱蓬浮床对海水养殖水体原位修复的效果[J]. 水土保持通报,2018,38(3):217-221. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.035. Teng Lihua, Zhao Xinyuan, Wang Chenyi, et al. In-situ remediation effect of *Suaeda salsa* floating bed on aquaculture water body[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):217-221.

In-situ Remediation Effect of *Suaeda Salsa* Floating Bed on Aquaculture Water Body

TENG Lihua[1], ZHAO Xinyuan[1], WANG Chenyi[1], GUO Weichao[1], LI Yang[2], TANG Weiwei[1]

(1. *College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100, China*; 2. *Ningbo Sheng Qian Environmental Tecmology Development Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang* 315100, *China*)

Abstract: [Objective] To study the growth of *Suaeda salsa* transferred from a terrestrial habitat to a floating-bed saline habitat and its effect on the in-situ water remediation of aquaculture ponds, in order to provide methods for aquaculture water body remediation by floating bed. [Methods] The growth, physiological and biochemical indexes of *S. salsa* under saltwater floating bed and land habitats during the restoration period were measured. Water quality of the aquaculture ponds was monitored as well. [Results] The *S. salsa* was well-adapted the floating bed habitat during the experiment period. Biomass was increased significantly, and the root activity and leaf nitrogen content of *S. salsa* in the floating bed habitat were higher than that in the land habitat. The total nitrogen, total phosphorus, ammonia and chemical oxygen demand was 3.34, 0.20, 0.47, and 0.35 mg/L, respectively, which was lower than the control treatment. [Conclusion] *S. salsa* can adapt to the aquatic environment after transferred from terrestrial habitat to floating-bed saline habitat, and it can remove nitrogen, phosphorus and other elements in the water through the root absorption. *S. salsa* has a good potential for in-situ remediation in aquaculture pond water.

Keywords: ***Suaeda* floating bed; growth characteristics; maricultural water; in-situ restoration**

收稿日期:2017-12-15 **修回日期**:2017-12-28

资助项目:浙江省公益性技术应用研究计划"二级生物净化系统处理海水池塘养殖尾水关键技术研究"(2015C32035);宁波市科技惠民项目(2017C50010);浙江省"生物工程"一流学科开放基金(KF2018004);浙江万里学院生态养殖模式与尾水水质调控科技特派团队项目。

第一作者:滕丽华(1973—),女(汉族),山东省莒南县人,博士,副教授,主要从事污染生态修复研究。E-mail:931792306@qq.com。

通讯作者:王趁义(1964—),男(汉族),江苏省徐州市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事环境污染治理与生态修复研究。E-mail:wcyzx@163.com。

随着养殖业的迅速发展，养殖户为了追求最高产量和最大经济效益，在饲养过程中增加了水产养殖投入品的用量，导致水体中残饵、生物残骸、排泄物、渔用肥料、化学药剂等积累[1]，进而导致氮、磷等元素严重超标，引起了严重的养殖水体富营养化，增加了养殖产品的病害风险并造成严重的经济损失。因此，对海水养殖水体中氮磷等营养盐的修复变得十分重要。

以往养殖水体修复的主要手段是异位修复，一般以构建人工湿地为主，人工湿地能有效去除养殖水体中的营养物，而人工湿地的缺点在于需要在养殖单元外建造，对于开放及半开放式的养殖池塘，原位修复更加适合[2]。

水上栽培农业技术是一种全新的水产养殖—种植型复合农业的原位修复方式，将水上栽培农业技术与适合的养殖模式因地制宜地结合在一起，实现水产品的健康养殖，已成为渔业环境保护工作者关注的重点[3]。生态浮床修复技术在淡水养殖池塘修复中已有一定的研究和应用基础[4]，目前对浮床的结构[5]、植物种类的筛选[6]及对水体的修复效果等都做了不少研究[7-8]。相对于淡水养殖，由于海水养殖水体特殊的盐碱环境，非盐生植物无法适应并达到修复的目的，而选择合适的在盐水环境下可以正常生长的盐生植物对于海水养殖的原位修复至关重要。

而本地盐生植物盐地碱蓬（*Suaeda salsa*）具有良好的环境适应性，在本地沿海滩涂生境中属于优势种，数目较多采集方便，且在食品、农业饲料等领域[9-10]具有较好的经济价值。但是碱蓬在含盐水体修复中的研究尚停留在实验室阶段[11-12]，而在实际海水养殖池塘条件下的修复则鲜有研究，且对修复过程中碱蓬生理生长指标的探讨较少。因此本研究拟探索盐地碱蓬浮床对南美白对虾（*Penaeus vannamei*）海水养殖池塘水体中氮磷等营养盐的修复效果及盐地碱蓬的生长情况和生理生化指标，以期为海水养殖池塘“鱼菜共生”的模式提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于浙江省宁波市象山县旦门乡东侧的滩涂水域的海水养殖基地，池塘为南美白对虾养殖场，面积约为 300 m^2，平均水深 1.1～1.5 m。池塘中南美白对虾投放 1 万尾左右，密度为 33 尾/m^2。试验池塘能通过闸门与外界海域相通，涨潮时定期开启闸门注入新鲜海水。试验期间温度为 25～35 ℃，水体盐度范围为 15‰～19‰。

1.2 试验材料

试验用浮床主体框架为 HDPE 高密度聚乙烯塑料，形状为圆形，直径为 34 cm，厚 5 cm。盐地碱蓬采自象山县涂茨镇道人山海边滩涂，将盐地碱蓬利用高密度海绵固定于浮床中并直接铺入海水养殖池塘，每个浮床栽培 3～4 株，浮床铺设面积达到试验池塘的 1/3，于 2016 年 6 月铺设完成。

1.3 测定项目与方法

测定修复前后浮床中盐地碱蓬生长情况，并比较盐地碱蓬在浮床和内陆 2 种生境中生理生化指标及浮床区和对照区修复前后水质指标。依据南美白对虾一茬的养殖周期，修复试验于 2016 年 6—8 月进行，共 65 d。浮床生境中盐地碱蓬生长指标分别在修复前后测定。在碱蓬浮床中生长 1 周后，开始测定 2 种生境中盐地碱蓬生理生化指标，每 10 d 测定 1 次，共 3 次；水质指标每 12 d 监测 1 次，共 5 次。水样分别在浮床区和对照区随机选取 3 个采样点，水样于采样点水面下 10～15 cm 处用采集器采集，水样采集及保存方法、化学需氧量、总磷、总氮和氨氮的测定方法均按照（GB/T12763.4-2007 海洋调查规范）标准进行。叶绿素、可溶性糖、氮含量以及根系活力，测定方法参照《植物生理生化试验原理和技术》[13]。利用皮尺测定株高、根长，利用重量法测定烘干前后的鲜重和干重，利用便携式盐度计测定水体盐度，利用梅特勒托勒多溶解氧仪测定溶解氧，采用梅特勒托勒多 FE20 型 pH 计测定 pH。试验数据利用 Origin 9.0 作图，SPSS 17.0 软件分析。

2 结果与讨论

2.1 盐地碱蓬生长及生理生化指标

栽培前后盐地碱蓬鲜干重及含水率如表 1 所示，可以看出盐地碱蓬在修复过程中鲜重、干重、株高及含水率均有显著增加（$p<0.05$），生长状态良好。

表 1 修复前后盐地碱蓬鲜干重及含水率变化

植物生长指标	鲜重(g/株)	干重(g/株)	株高(cm/株)	根系长度(cm/株)	含水率(%/株)
修复前	0.91±0.20^b	0.35±0.10^b	11.15±0.10^b	4.90±0.10^b	62.13±2.67^b
修复后	9.33±0.30^a	1.40±0.25^a	36.60±0.50^a	20.50±0.50^a	84.52±1.65^a
增量	8.42±0.10	1.05±0.15	25.45±0.40	15.60±0.40	22.39±1.02

注：同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

盐地碱蓬生理指标变化如图 1 所示,盐地碱蓬在浮床生境和内陆生境的平均根系活力分别为 56.16,21.96 μg/(g·h),盐地碱蓬在内陆生境根系活力显著低于浮床生境($p<0.05$)。唐瑜等[14]的研究证明水培植物根系活力显著高于土培,水培对水分及养分的吸收能力显著优于土培,浮床栽培盐地碱蓬其较高的根系活力为氮磷吸收提供了有利条件,因此盐地碱蓬在浮床生境中对水体中营养盐有更好的吸收能力。浮床中盐地碱蓬叶片的含氮量(12.90 mg/g)也高于内陆生境盐地碱蓬叶片含氮量(10.70 mg/g),这也说明盐地碱蓬在浮床生境中较内陆生境有更高的根系活力。

叶绿素含量会直接影响光合速率和光合产物的形成[15]。盐地碱蓬在浮床生境和陆地生境中其叶绿素平均含量分别为 2.40,4.03 mg/g,盐地碱蓬在浮床生境低于陆地生境,这可能是浮床生境中水淹缺氧及盐分对盐地碱蓬的胁迫[16],以及水体中矿物质的匮乏造成。盐分胁迫会导致盐地碱蓬叶绿素降解酶活性增加,加强了对叶绿素的降解,导致叶绿素含量下降[17]。另外,一些矿物质如锌、锰等,这些矿物质元素有助于植物合成叶绿素,并促进植物的光合作用[18],而浮床生境矿物元素较内陆生境缺乏。

浮床盐地碱蓬和内陆生境中盐地碱蓬的叶绿素 a/b 平均比分别为 8.71,5.97,浮床生境显著高于内陆生境($p<0.05$)。叶绿素 a/b 比值反映叶绿体中类囊体的垛叠程度,类囊体垛叠程度越高,光抑制越不易发生,植株抵御氧化胁迫的能力就越强[16]。由于换水作用导致水体盐度波动,浮床生境中碱蓬受到盐胁迫,进而产生氧化胁迫,使得叶绿体类囊体垛叠以防止光抑制。浮床生境中盐地碱蓬总叶绿素合成并未受到影响,因此盐地碱蓬在浮床生境中具有较好光合调节能力。

浮床生境和内陆生境盐地碱蓬叶片(鲜重)中可溶性糖平均含量分别为 0.72,0.89 mg/g。浮床生境中盐地碱蓬可溶性糖水平低于内陆生境,这与盐地碱蓬在不同生境中受胁迫的环境因素有关。可溶性糖是植物体内的合成有机溶剂的碳架和重要的能量来源[19],也是用于平衡细胞质与细胞间渗透势,参与渗透调节的重要部分[20]。浮床生境中盐地碱蓬因处于盐分及水淹胁迫,可溶性糖主要用于渗透调节,呈先下降后上升趋势;而内陆生境中盐地碱蓬的可溶性糖变化的原因较多,高温、干旱等因素都会引起可溶性糖含量变化,因此陆地碱蓬可溶性糖波动较大,而两种生长条件下碱蓬的可溶性糖在后期无显著差异($p>0.05$),均正常生长。

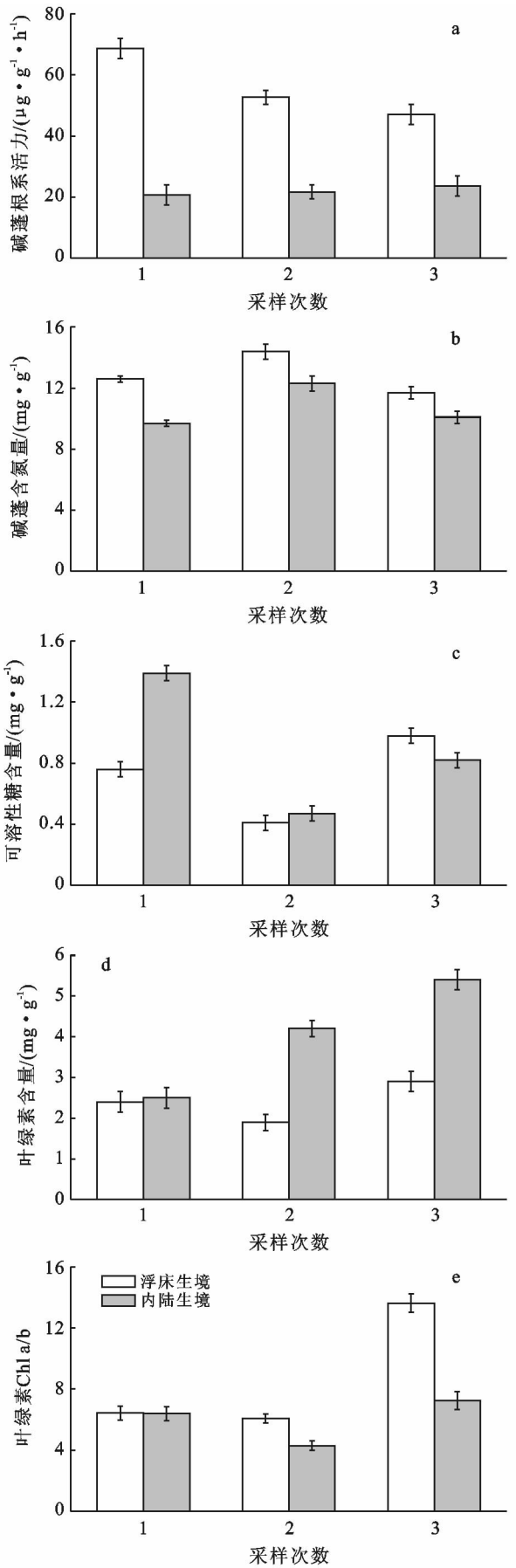


图 1　不同生境下盐地碱蓬叶片氮含量、可溶性糖、叶绿素含量、叶绿素 a/b 比和根系活力变化

综上所述，盐地碱蓬具有良好耐盐能力，能适应浮床生境，浮床栽培提高了盐地碱蓬的根系活力，并促进了盐地碱蓬对营养的利用。

2.2 养殖池塘水质变化

碱蓬浮床区及对照区水质变化情况如图 2 所示，碱蓬浮床区域和对照区溶解氧变化范围分别为 9.90～9.50，9.86～9.12 mg/L，pH 值变化范围分别为 8.02～8.6，8.05～8.7。碱蓬浮床区溶解氧浓度明显对照区，浮床区 pH 值变化较对照区稳定，说明浮床区水质理化性质比对照区更好，有利于水产品的养殖。

浮床区和对照区总氮浓度的波动范围分别为 2.57～3.34，2.86～3.52 mg/L，均呈上升趋势；氨氮浓度波动范围分别为 2.24～0.58，1.93～1.05 mg/L；总磷浓度波动范围分别为 0.098～0.200，0.15～0.22 mg/L；高锰酸盐指数波动范围分别为 6.48～4.98，6.33～5.33 mg/L。碱蓬浮床虽对氮、磷有一定去除作用，但由于试验过程中饲料投放量的增加、以及虾的生长代谢，池塘中的总氮、总磷总体呈现出小幅度上升的趋势，这与李建柱等研究结果类似[21]。但是浮床区总体低于对照区，表现一定的改善作用。

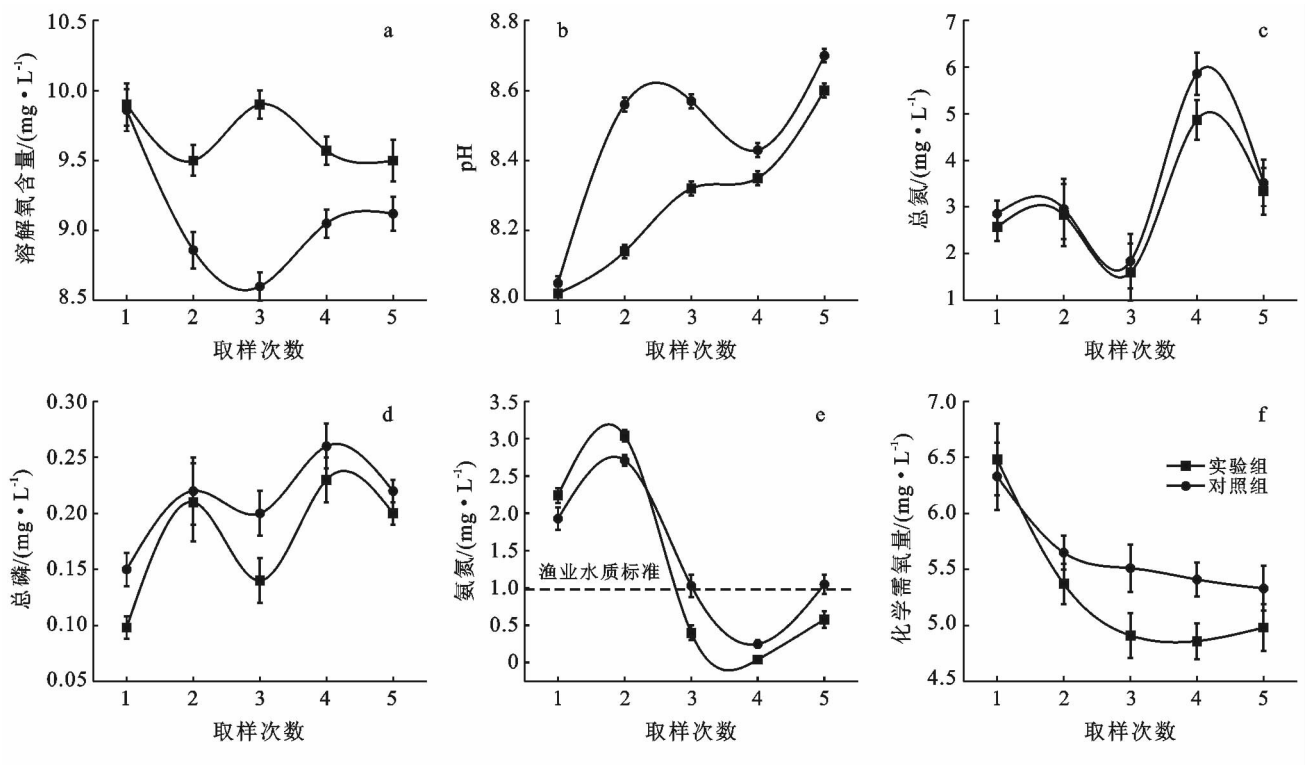


图 2 养殖池塘水质变化情况

碱蓬浮床对水体中氨氮及化学需氧量有显著去除作用，本试验中氨氮的去除途径主要有碱蓬吸收作用、硝化作用和挥发作用等。一方面，池塘 pH>8，满足氨挥发条件[22]，存在氨氮的挥发，而由于碱蓬根系生长旺盛，为硝化细菌提供了有利的吸附位点，且浮床区水体 pH 值和溶解氧条件有利于硝化细菌的生长繁殖[23-24]，硝化作用增强了浮床区水体中氨氮转化作用。同时，浮床生境中碱蓬有较好的根系活力，且水体中 pH 值和溶解氧条件有利于碱蓬对水体中氨氮的吸收和利用。另外，碱蓬根系中富集的微生物作用也增加了对有机物的分解和去除，因此试验结束浮床区化学需氧量含量为 4.98 mg/L 显著低于对照区的5.33 mg/L。综上所述浮床区氨氮和化学需氧量均显著低于对照区。

浮床区总氮低于对照区一方面是由于浮床区水体中氨氮去除，另一方面由于碱蓬对水体中硝态氮的直接吸收作用。有研究证明硝态氮一方面能直接被碱蓬吸收利用并用于合成自有机氮；另一方面，一部分硝态氮在盐碱胁迫时也作为碱蓬的渗透调节物质而被储存于液泡中[25]。由于池塘持续的增氧曝气作用，水体中溶解氧含量较高，利于硝化而不利于反硝化的进行，造成水体中硝态氮含量积累，而饲料投放量的增加以及白对虾的生长代谢等因素导致了浮床区和对照区水体总氮均呈上升趋势。

浮床区总磷低于对照区一方面是由于在有氧条件下，碱蓬对水体的磷酸盐吸收作用，同化为自身组织[26]，另一方面根系富集的微生物也能直接利用水体中的磷用于生命代谢的活动，因此浮床区水体中总磷

水平低于对照区。与总氮变化情况类似,随着饲料投放量的增加和白对虾的生长代谢,浮床区和对照区总磷浓度也呈上升趋势,因此仍然需对水质进行一定调控。

3　结 论

盐地碱蓬浮床栽培前后平均株高、根长、鲜重、干重均显著增加,同时,盐地碱蓬在浮床生境中较陆地生境有更高的根系活力,表明盐地碱蓬适宜于浮床盐水栽培。随着浮床中碱蓬的正常生长,其对海水养殖用水中氮、磷具有一定的控制效果,修复后浮床区总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数均低于对照池塘,其中氨氮满足渔业养殖水质标准。因此,盐地碱蓬浮床对海水养殖水体原位修复具有一定的效果,可作为海水养殖水体原位修复的候选植物和修复方法。

[参 考 文 献]

[1] 赵欣园,于晓磊,滕丽华,等. 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,2018,37(3):470-474.

[2] Li Wengxiang, Li Wei, Lin Mingli, et al. In situ nutrient removal from aquaculture wastewater by the aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* on floating beds[J]. Acta Scientiae Circulmstantiae, 2011,31(8):1670-1675.

[3] 宋超,陈家长,戈贤平,等. 浮床栽培空心菜对罗非鱼养殖池塘水体中氮和磷的控制[J]. 中国农学通报,2011,27(23):70-75.

[4] Duguma D, Rugmanjones P, Kaufman M G, et al. Bacterial communities associated with culex mosquito larvae and two emergent aquatic plants of bioremediation importance[J]. Plos One, 2013,8(8):1-10.

[5] 郑立国. 组合型生态浮床对富营养化水体的净化效果及其机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2013:83-92.

[6] Buzby K M, West T P, Waterland N L, et al. Remediation of flow-through trout raceway effluent via aquaponics[J]. North American Journal of Aquaculture, 2017,79(1):53-60.

[7] 章文贤,韩永和,卢文显,等. 植物生态浮床的制备及其对富营养化水体的净化效果[J]. 环境工程学报,2014,8(8):3253-3258.

[8] Moroyoquirojo L, Floresverdugo F J, Hernándezcarmona G, et al. Nutrient removal using two species of mangrove (*Rhizophora mangle* and *Laguncularia racemosa*) in experimental shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds[J]. Ciencias Marinas, 2014,38(2):333-346.

[9] Wang Lei, Zhao Zhenyong, Zhang Ke, et al. Oil content and fatty acid composition of dimorphic seeds of desert halophyte *Suaeda aralocaspica*[J]. African Journal of Agricultural Research, 2012,7(12):13589-13597.

[10] Oueslati S, Trabelsi N, Boulaaba M, et al. Evaluation of antioxidant activities of the edible and medicinal Suaeda species and related phenolic compounds[J]. Industrial Crops & Products, 2012,36(1):513-514.

[11] 潘军标,王栋,王趁义,等. 碱蓬对富营养化海水养殖水体中氮磷的去除研究[J]. 环境保护科学,2018,44(2):37-41.

[12] 胡杰,王晓俊,王趁义,等. 碱蓬浮床对海水养殖尾水的修复效果研究[J]. 水土保持通报,2018,38(2):281-284, 291.

[13] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[14] 唐瑜. 水培对几种观赏植物形态结构和生理指标的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2016:27-29.

[15] 彭斌,许伟,邵荣,等. 盐胁迫对不同生境种源盐地碱蓬幼苗生长、光合色素及渗透调节物质的影响[J]. 海洋湖沼通报,2017,1(1):63-72.

[16] 高奔,宋杰,刘金萍,等. 盐胁迫对不同生境盐地碱蓬光合及离子积累的影响[J]. 植物生态学报,2010,34(6):671-677.

[17] 彭益全,谢橦,周峰,等. 碱蓬和三角叶滨藜幼苗生长、光合特性对不同盐度的响应[J]. 草业学报,2012,21(6):64-74.

[18] 李焕忠,张吉立. 5 种微量元素对紫叶矮樱叶绿素 a 含量影响的研究[J]. 中国农学通报,2010,26(16):242-245.

[19] 肖强,郑海雷,陈瑶,等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(4):373-376.

[20] 简令成,王红. 逆境植物细胞生物学[M]. 北京:科学出版社,2009:115-151.

[21] 李建柱,侯杰,张鹏飞,等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(10):3071-3080.

[22] 姬芬,张饮江,王芳,等. 组合型生态浮床系统脱氮效果的周年变化[J]. 上海海洋大学学报,2017,26(2):235-242.

[23] Bartucca M L, Mimmo T, Cesco S, et al. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system[J]. Science of the Total Environment, 2016,542:803-808.

[24] Liu Junzhuo, Wang Fengwu, Liu Wei, et al. Nutrient removal by up-scaling a hybrid floating treatment bed (HFTB) using plant and periphyton: From laboratory tank to polluted river[J]. Bioresource Technology, 2016,207:142-149.

[25] 丁效东. 硝态氮在盐生植物体内的渗透调节作用和吸收动力学的研究[D]. 北京:中国农业大学,2006:10-25.

[26] Guo Yiming, Liu Yunguo, Zeng Guangming, et al. Arestoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,26(5):1090-1098.