

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240926003

<http://www.yykxjz.cn/>

迟赛赛, 李秋芬, 罗梓峻, 孙波, 田文杰, 马莹, 董志国, 崔正国. 北美海蓬子对养殖尾水盐度和营养盐水平的适应能力研究. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 248–257

CHI S S, LI Q F, LUO Z J, SUN B, TIAN W J, MA Y, DONG Z G, CUI Z G. The adaptability of *Salicornia bigelovii* to salinity and nutrient levels in aquaculture effluent. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(2): 248–257

北美海蓬子对养殖尾水盐度和营养盐水平的适应能力研究^{*}

迟赛赛^{1,2} 李秋芬^{2①} 罗梓峻² 孙 波² 田文杰²
马 莹² 董志国¹ 崔正国²

(1. 江苏海洋大学海洋科学与水产学院 江苏 连云港 222000;
2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071)

摘要 为研究耐盐植物北美海蓬子(*Salicornia bigelovii*)对海水养殖尾水不同营养盐浓度和盐度配比的适应能力, 分别配制低(LNC)、中(MNC)、高(HNC)3个营养盐浓度等级和0、20、30、404个盐度等级交叉的海水养殖尾水, 灌溉培育60 d, 同时测定北美海蓬子的生长(地上部生长高度、茎节数、腋芽与分支数、生物量)和生理[叶绿素、丙二醛(MDA)]指标。结果显示, 在中低营养盐水平下, 0~30盐度范围内北美海蓬子地上部生长高度、茎节数、腋芽与分支数以及鲜重、干重积累量最高可达15.86 cm、13节、18个、29.88 g、1.35 g, 显著高于40盐度水平的11.52 cm、10节、12个、21.2 g、0.72 g ($P<0.05$), 且在盐度20及30下更有利于其茎节分化, 而当盐度达到40时植株受到明显胁迫, 北美海蓬子MDA含量显著高于其他盐度水平($P<0.05$)。高营养盐条件下, 盐度40虽不利于植株干物质积累, 但其他生长指标无显著性差异, 说明营养盐浓度的升高可以有效减轻不同盐度对北美海蓬子生长差异性的影响并缓解高盐度下的胁迫效应; 同时, 高营养盐处理组平均叶绿素含量为3.24 mg/(g·FW), 显著高于低营养盐组[2.28 mg/(g·FW)]和中度营养盐组[2.45 mg/(g·FW)]($P<0.05$), 说明营养盐浓度升高促进了植株叶绿素合成。因此, 北美海蓬子可耐受0~30的盐浓度范围, 适度盐度(20、30)更有利于其生长, 此外, 提高营养盐浓度可以缓解盐胁迫作用及削弱不同盐度对北美海蓬子生长造成的影响, 并有利于叶绿素合成。综上所述, 北美海蓬子可作为净污植物处理高盐度富营养化养殖尾水, 同时具有作为耐盐植物进行大规模推广应用的潜力。

关键词 耐盐植物; 北美海蓬子; 海水养殖尾水; 盐胁迫; 富营养化

中图分类号 X173; X55 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)02-0248-10

当前海水养殖产业迅猛发展, 排放的尾水日益增多, 这一现象加剧了环境污染问题。养殖尾水中含有残饵、粪便等形成的有机物和无机氮磷等营养盐, 这些富含氮、磷的养殖尾水若直接排放会加剧海洋富营

养化(Herbeck *et al*, 2013; Porchas *et al*, 2012), 导致藻类大量繁殖, 破坏海洋生态平衡, 并对沿岸生态系统造成破坏(Zhou *et al*, 2022; 过峰等, 2012)。为此, 有效的养殖尾水处理和利用主要包括物理、化学、生物

* 国家自然科学基金(42176219)和国家重点研发计划(2019YFD091200)共同资助。迟赛赛, Email: chisaisai@163.com

① 通信作者: 李秋芬, 研究员, Email: liqf@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-09-26, 收修改稿日期: 2024-11-04

等处理方法(Kashem *et al*, 2023), 生物处理(如利用植物进行处理)因生态友好而得到了广泛应用(李超等, 2024)。植物通过自身代谢活动吸收水体中的氮、磷等营养物质, 合成自身所需物质, 从而达到对污染物的降解与处理(Narayanasamydamodaran *et al*, 2024; Xu *et al*, 2019), 如果将这些富含有机物的养殖尾水用于植物灌溉利用, 不仅可以减少海洋污染, 还可以开展具有一定经济价值的耐盐植物培育, 实现资源利用最大化。由于海水养殖尾水的高盐度特性, 传统陆生植物在适应性和净化效果上均存在局限, 因此, 筛选和培育能够适应高盐环境的耐盐植物进行海水养殖尾水处理成为尾水处理领域的研究热点。已有研究表明, 千屈菜(*Lythrum salicaria*)、水葱(*Scirpus validus*) (范真等, 2019)、芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis*)(徐秀玲等, 2012)等植物在不同盐度条件下展现出良好的生长状况和净化效果, 且水培碱蓬(*Suaeda salsa*) (王趁义等, 2019)和海马齿(*Sesuvium portulacastrum*)(曾碧健等, 2016)作为生态处理手段在处理海水养殖尾水方面取得了一定成效; 互花米草(*Spartina alterniflora*)和芦苇对海水养殖废水中的氮均具有一定的净化效果(Mozder *et al*, 2010; 许永辉等, 2018), 但这些植物可耐受的盐度范围相较于自然海水接近30的盐度仍显不足, 且存在生态破坏或低温适应性差等问题。因此, 在海水养殖尾水处理领域, 目前缺乏能够耐受高盐度(接近自然海水盐度)且适应北方气候条件的耐盐植物工具种。这一空白限制了现有植物在处理海水养殖尾水方面的应用范围和效果, 因此, 开发新的耐盐植物成为了该领域亟待解决的问题。

北美海蓬子(*Salicornia bigelovii*)为藜科(Chenopodiaceae)、盐角草属(*Salicornia*)一年生茎肉质化专性盐生植物, 具有一定药用价值, 其植株嫩芽可做蔬菜或植物盐, 种子可榨油。它可种植在干旱盐渍土地区, 也可以用海水等咸水进行灌溉, 具有独特的耐盐潜力(Roberta *et al*, 2022)。目前, 对于北美海蓬子, 缺乏从植物对养殖尾水适应性角度探讨其在不同营养盐浓度和盐度配比下的生长状况及生理响应的报道。因此, 本研究以北美海蓬子作为实验对象, 通过监测在不同营养盐浓度和盐度条件下, 其生长指标和生理指标响应的差异, 确定北美海蓬子处理养殖尾水的适应范围和最佳条件, 为富营养化养殖尾水的有效处理与资源化利用提供科学依据和技术支撑, 促进海水养殖产业的可持续发展。同时, 这一研究也将为耐盐植物资源的开发与利用开辟新的方向。

1 材料与方法

1.1 植物种子来源与幼苗培育

北美海蓬子种子购自江苏盐城绿苑盐土农业科技有限公司。经脱粒后, 去除未成熟或破损的种子, 通过蒸馏水快速冲洗, 去除杂质并烘干表面水分。在最优条件下(赤霉素2000 mg/L、盐度5、温度20℃、浸种时间12 h, 另文发表)进行7 d萌发处理后, 移栽至土基栽培, 种植密度75株/m²。培育土壤采用经过高温灭菌处理的干燥园艺沙土, 各培养盆中加入20 cm沙土土基, 使用20 cm×20 cm×30 cm的PP树脂花盆作为培养容器。

1.2 实验设计

本研究在中国水产科学研究院黄海水产研究所琅琊基地进行, 实验期间平均气温为26.5℃。设置0、20、30和40 4个盐度水平(以自然海水盐度30为基准, 设置上下4个盐度水平范围), 与低营养盐(low nutrient concentration, LNC)、中营养盐(moderate nutrient concentration, MNC)和高营养盐(high nutrient concentration, HNC)3个营养盐水平进行混合交叉实验, 实验分组见表1。

盐度等级通过添加NaCl试剂(分析纯)调配控制, LNC、MNC和HNC3个营养盐水平由养殖尾水调配而成。依据富营养化指数法(徐艳东等, 2016)对富营养化海水划分等级标准(表2), 3个营养盐水平分别代表轻度富营养化、中度富营养化和重度富营养化海水, 各等级灌溉水实际营养盐的参数值如表3所示。

表1 交叉实验

Tab.1 Cross experiment

| 富营养化水平 Eutrophication level | 盐度 Salinity | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0 | 20 | 30 | 40 |
| 低营养盐 LNC | LNC ₀ | LNC ₂₀ | LNC ₃₀ | LNC ₄₀ |
| 中营养盐 MNC | MNC ₀ | MNC ₂₀ | MNC ₃₀ | MNC ₄₀ |
| 高营养盐 HNC | HNC ₀ | HNC ₂₀ | HNC ₃₀ | HNC ₄₀ |

表2 富营养化水平判定标准

Tab.2 Criteria for determining the level of eutrophication

| 富营养化水平 Eutrophication levels | 富营养化指数 Eutrophication index (E) |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 低营养盐 LNC | 1≤E≤3 |
| 中营养盐 MNC | 3<E≤9 |
| 高营养盐 HNC | E>9 |

表 3 不同富营养化水平灌溉水中的营养盐浓度
Tab.3 Nutrient concentration in different eutrophication levels of irrigation water/(mg/L)

| 富营养化水平 Eutrophication levels | 营养盐浓度 Nutrient concentration | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | 氨氮 Ammonia | 亚硝 Nitrite | 硝氮 Nitrate | DIN | DIP | COD | E |
| 低营养盐 LNC | 0.05±0.01 | 0.01±0 | 0.25±0.04 | 0.31±0.07 | 0.01±0.00 | 3.20±0.62 | 2.38 |
| 中营养盐 MNC | 0.07±0.01 | 0.01±0 | 0.53±0.12 | 0.62±0.13 | 0.01±0.00 | 5.30±0.47 | 8.78 |
| 高营养盐 HNC | 0.12±0.02 | 0.04±0.01 | 1.00±0.20 | 1.16±0.11 | 0.02±0.00 | 8.00±0.96 | 42.29 |

本研究水质参数的测定参照海洋监测规范第 7 部分(GB 17378.4-2007)。

1.3 指标的测定与计算方法

实验期间每天灌溉 200~500 mL 养殖尾水, 15 d 记录 1 次植株地上部高度、茎节数及腋芽和分叉数, 用于对比生长周期内地上部生长情况, 连续观测 60 d 后, 采集培养盆所有植株用蒸馏水洗净土壤, 吸干表面水分后称量植株鲜重, 部分植株采集地上部测定叶绿素、丙二醛(MDA)含量, 另一部分转移至烘箱, 40 °C 烘干杀青 48 h 至恒重, 称量植株干重, 计算干鲜比。叶绿素含量测定采用乙醇提取比色法(李合生, 2000), MDA 含量测定采用 Solarbio (BC0020) 丙二醛含量检测试剂盒(BOXBIO, 北京), 按照说明书步骤操作。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2016 记录测量数据和生长指标的计算(平均值、标准差); IBM SPSS Statistics 27 进行生长指标和生理指标的单因素方差分析(one-way ANOVA); 使用软件 Origin 2023 整理数据及绘图; 图表中数据为平均值±标准差(Mean±SD)。

2 结果与分析

2.1 不同盐度和营养盐浓度处理下北美海蓬子外部形态特征差异

图 1 展示了 60 d 不同盐度和营养盐浓度灌溉培养后, 采集各组植株进行对比, 不同处理组北美海蓬子植株在形态上(植株地上部高度、腋芽与分支数量等)具有明显差异。

2.2 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水对北美海蓬子地上部生长高度的影响

图 2 展示了不同处理组北美海蓬子地上部高度随时间变化的趋势, 随实验时间的增加, 不同处理组

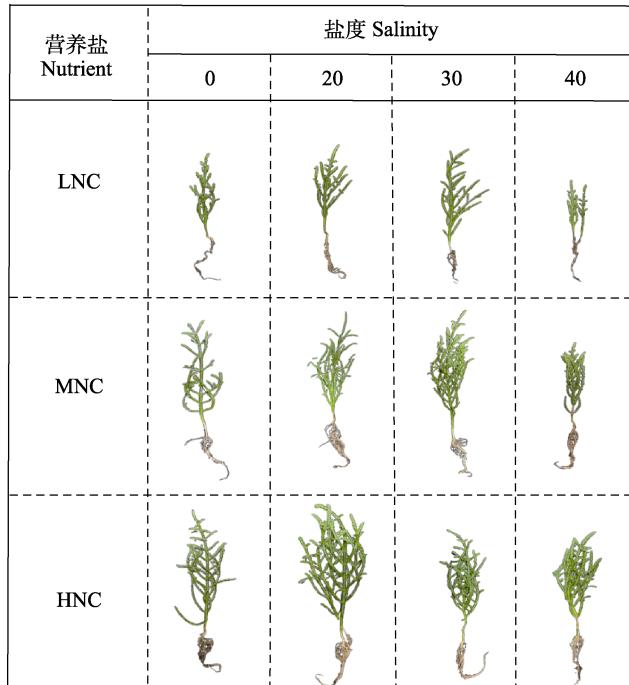


图 1 不同处理下北美海蓬子外部形态特征

Fig.1 The external morphological characteristics of *S. bigelovii* under different treatments

的北美海蓬子地上部高度均呈增加趋势, 从初始约 10 cm 高度增长至 20 cm 高度。分析同一盐度下不同营养盐浓度的影响, 在实验前期(0~30 d), 营养盐浓度差异对植株地上部高度的影响不显著($P>0.05$), 在后期(45~60 d)其影响逐渐显现, 盐度为 40 时, HNC 和 MNC 处理组地上部高度显著高于 LNC 处理组($P<0.05$), 在 45 d 时, HNC 和 MNC 处理组地上部高度分别高出 LNC 处理组 33% 和 23.1%; 60 d 时差距进一步拉大, HNC 和 MNC 处理组地上部高度分别高出 LNC 处理组 37.5% 和 24.3%, 这表明在盐度 40 下, 营养盐浓度的升高对北美海蓬子的生长影响更加明显。分析同一营养盐水平下不同盐度的影响, 在 LNC 和 MNC 水平下, 高盐度抑制效应逐渐显现。LNC 水平下, 盐度 40 处理组在 30、45、60 d 分别显著低于其他 3 个盐度平均水平 20.6%、

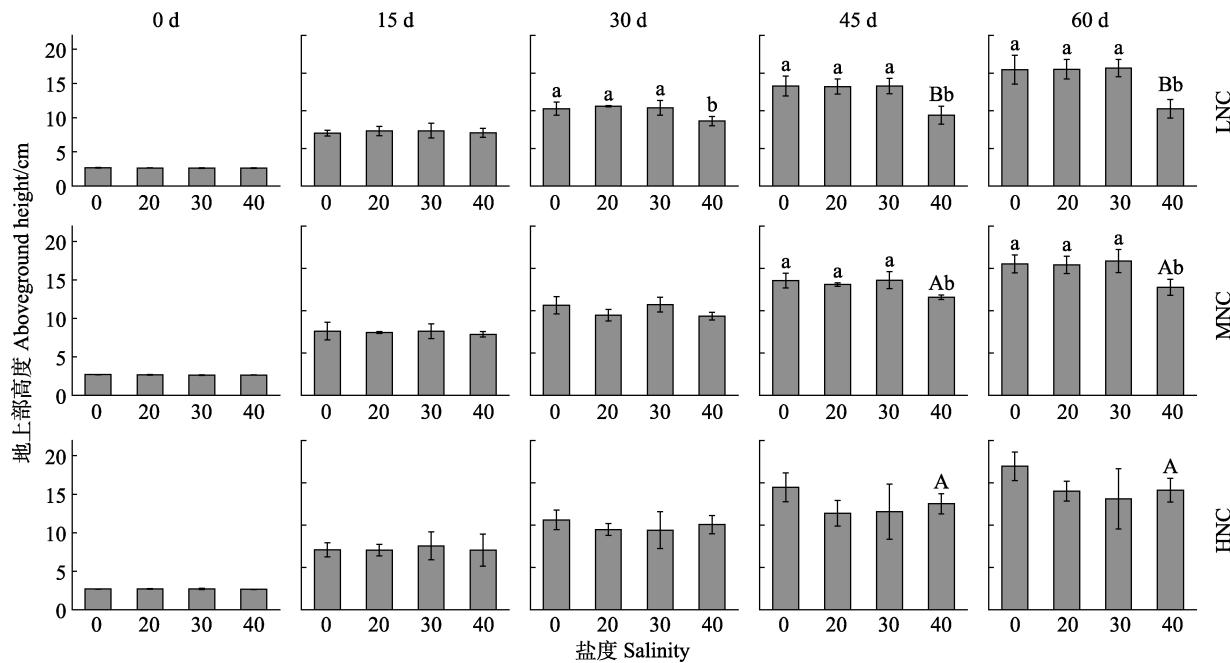


图 2 不同处理对北美海蓬子地上部生长的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the growth trend of the upper part of *S. bigelovii*

不同字母代表在 $P<0.05$ 条件下具有显著差异, 不同小写字母代表小图中同一营养盐水平下不同盐度间具有显著性差异, 不同大写字母代表同一盐度水平下不同营养盐间具有显著性差异, 未标注字母代表无显著性差异。下同。

Different letters represent significant differences under $P<0.05$, and different lowercase letters represent significant differences between different salinities under the same nutrient level in the small graph.

Different capital letters represent significant differences between different nutrients at the same salinity level, and unlabeled letters represent no significant differences. The same below.

40.9% 和 51.4% ($P<0.05$); MNC 水平下盐度对地上部高度的影响延迟显现, 45 d 后, 盐度 40 处理组在 45 d、60 d 分别显著低于其他 3 个盐度平均水平 15.9%、22.2% ($P<0.05$); 在 HNC 水平下, 盐度影响不显著 ($P>0.05$)。

综合分析所有处理组, 在中低营养盐水平下, 盐度 40 抑制了北美海蓬子地上部高度生长, 但随着营养盐浓度升高, 高盐度抑制效应得以缓解且能够削弱不同盐度对地上部高度差异性影响。

2.3 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水对北美海蓬子茎节分化的影响

图 3 展示了不同处理组北美海蓬子茎节数量的增长情况, 随实验时间的增加, 不同处理组的北美海蓬子茎节数量均呈增加趋势。在同一盐度下, 营养盐浓度对北美海蓬子茎节分化影响不显著($P>0.05$)。进而分析同一营养盐水平下盐度的影响, 在 LNC 和 MNC 水平下, 盐度对茎节数量的影响出现阶段性差异, 随时间演变, 中等盐度(20、30)组茎节分化逐渐占优势($P<0.05$); 在 LNC 水平下, 30 d 后茎节分化开始出现显著性差异($P<0.05$), 在 60 d 时, 盐度 20、30 处

理组显著高于盐度 40 处理组 21.6% 和 25.8% ($P<0.05$), 在 MNC 水平下, 盐度的影响延迟显现, 45 d 后开始出现显著性差异($P<0.05$), 60 d 时盐度 30 处理组高于 40 处理组(15.4%)($P<0.05$), 说明盐度达到 40 时, 茎节分化会受到抑制。在 HNC 水平下, 不同盐度处理对茎节数量并无显著性影响($P>0.05$), 随营养盐浓度升高, 盐度对茎节生长的直接效应可能被削弱或掩盖。

2.4 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水对北美海蓬子腋芽与分支数量的影响

图 4 展示了不同处理组北美海蓬子腋芽与分支数, 随实验时间延长, 不同处理组北美海蓬子腋芽与分支数均呈增加趋势, 且主要发生在后期(45~60 d)。在同一盐度下, 营养盐水平差异对北美海蓬子腋芽与分支数影响不显著($P>0.05$)。进一步分析同一营养盐水平下盐度的影响, 在 LNC 水平下, 在 45 d 后腋芽与分支数表现出显著性差异($P<0.05$), 盐度 0、20、30 处理组显著高于盐度 40 组 ($P<0.05$), 前三者平均数量较盐度 40 处理组在 45 d、60 d 时分别高出 62.7% 和 55.9%; 在 MNC 和 HNC 营养盐水平下, 盐

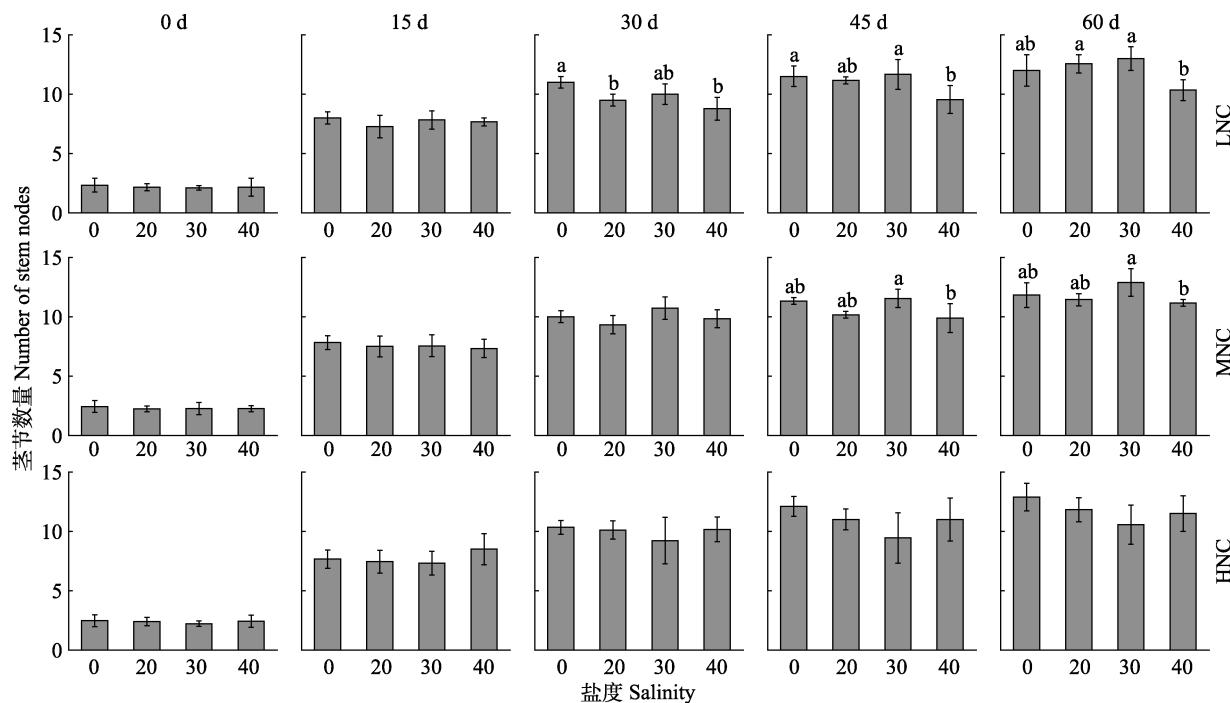


图 3 不同处理对北美海蓬子茎节分化的影响

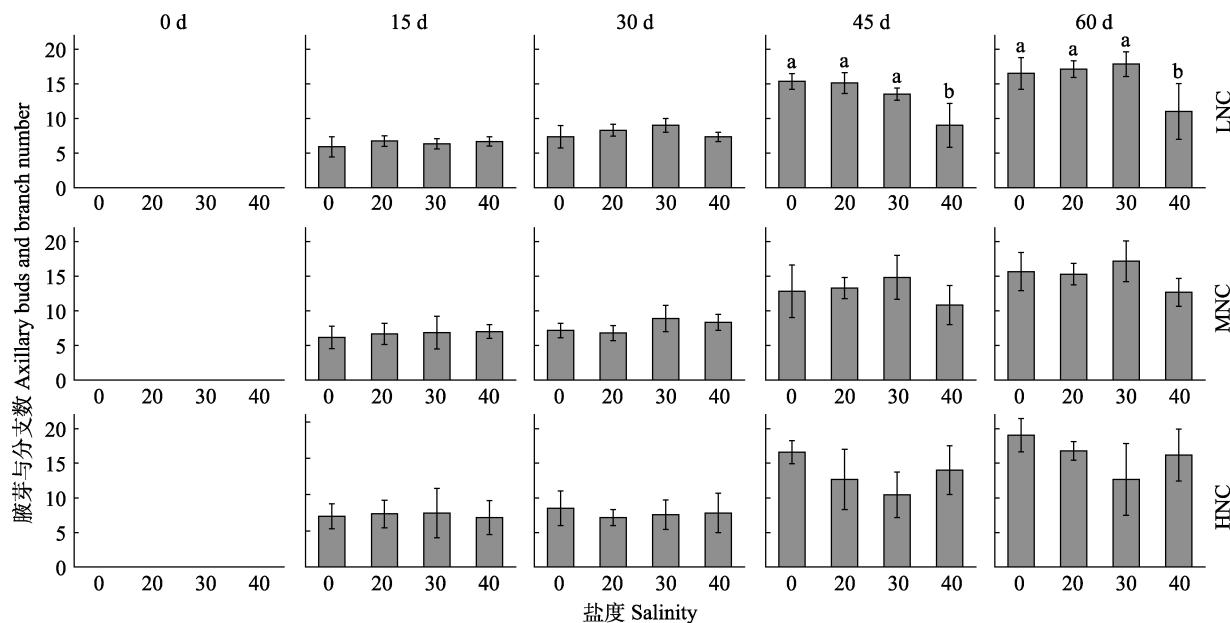
Fig.3 Effects of different treatments on stem node differentiation of *S. bigelovii*

图 4 不同处理对北美海蓬子腋芽与分支的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the differentiation of axillary buds and branches of *S. bigelovii*

度对腋芽与分支数影响并不显著($P>0.05$)，说明在低营养盐浓度下，盐度 40 抑制了腋芽与分支的分化，而营养盐浓度升高有助于缓解盐度对腋芽与分支数的差异性影响并且高盐度抑制效应也被削弱。

2.5 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水对北美海蓬子生物量变化的影响

图 5 展示了 60 d 时植株的鲜重(FW)与干重(DW)

积累情况。分析营养盐浓度的影响，在鲜重方面，HNC 和 MNC 处理组平均鲜重积累量分别为 30.38 g 和 27.13 g，均显著高于 LNC 组(21.73 g) ($P<0.05$)，其中，HNC₂₀、LNC₄₀ 为各组中鲜重最高与最低的组别，分别为 34.99 g 和 19.08 g。在干重方面，MNC 和 HNC 处理组的平均干重分别为 1.19 g 和 1.21 g，显著高于 LNC 组(0.86 g) ($P<0.05$)，同样，HNC₂₀、LNC₄₀ 也是各组中干重最高与最低的组别。这表明营

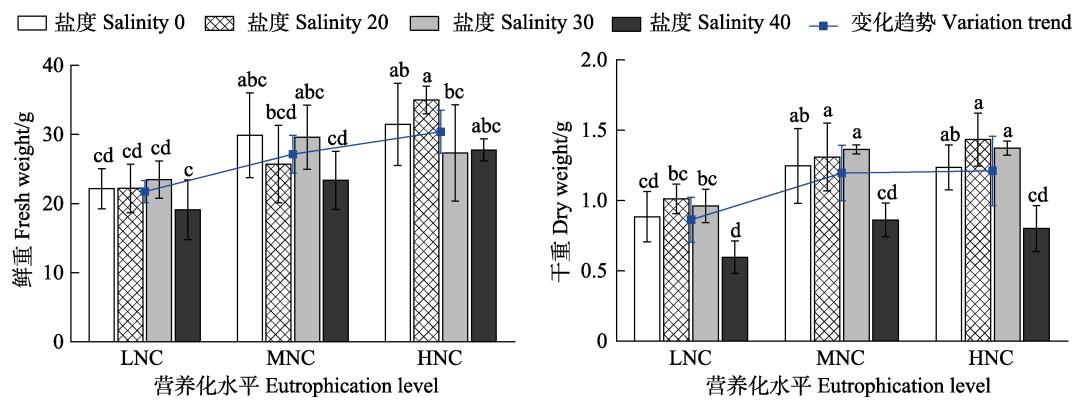


图 5 不同处理条件下北美海蓬子植株的湿重与干重

Fig.5 Fresh weight and dry weight of *S. bigelovii* plants under different treatment conditions不同字母代表在 $P<0.05$ 条件下具有显著差异, 下同。Different letters represent significant differences under $P<0.05$. The same below.

养盐浓度的升高促进了北美海蓬子鲜重增加与干物质积累量。同一营养盐浓度水平条件下, 分析盐度的影响, 在任一营养盐浓度下, 盐度 40 组植株的干重均为组内最低的组别, 盐度 0、20、30 处理组平均干重积累量分别高出盐度 40 处理组 60%、51.2% 和 67.9% ($P<0.05$)。这表明在任一营养盐浓度下, 盐度 40 均不利于北美海蓬子干物质积累。

2.6 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水灌溉对北美海蓬子叶绿素变化的影响

图 6 展示了 60 d 时不同处理组北美海蓬子的叶绿素含量。HNC 处理组的平均叶绿素含量为 3.24 mg/(g·FW), 显著高于 LNC 组[2.28 mg/(g·FW)] 和 MNC 组[2.45 mg/(g·FW)]($P<0.05$); HNC₃₀ 与 LNC₃₀ 分别为各处理中最高和最低的组别, 叶绿素含量分别为 3.59 mg/(g·FW) 和 2.13 mg/(g·FW), 说明营养盐浓度升高对促进北美海蓬子体内合成叶绿素含量影响

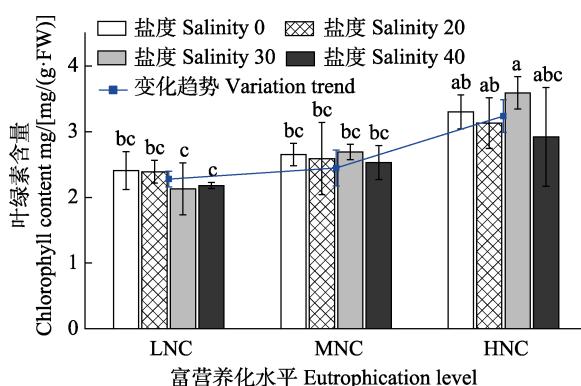


图 6 不同处理条件下北美海蓬子植株的叶绿素含量

Fig.6 Chlorophyll content of *S. bigelovii* plants under different treatment conditions

显著($P<0.05$), 但在同一营养盐浓度条件下, 不同盐度处理对北美海蓬子叶绿素含量的影响不显著($P>0.05$)。

2.7 不同盐度和营养盐浓度养殖尾水对北美海蓬子组织中 MDA 含量变化的影响

图 7 展示了不同处理条件下北美海蓬子体内 MDA 含量。结果显示, LNC₄₀ 与 LNC₀ 是各处理组中 MDA 含量最高与最低的组别, 分别为 21.12 nmol/(g FW·h) 和 4.52 nmol/(g FW·h)。在中低营养盐水平下(LNC、MNC), 盐度 40 处理组显著增加了对北美海蓬子的胁迫($P<0.05$), 平均高于其他盐度处理组各 180.5% 和 86.8%。LNC、MNC 处理组 MDA 的平均含量分别为 10.92 nmol/g·FW 和 10.88 nmol/g·FW, 高于 HNC 处理组[7.22 nmol/(g·FW)], 并且在 HNC 水平下, 不同盐度组的 MDA 含量差异不显著, 说明提高营养盐浓度降低了 MDA 含量, 减缓了高盐度对北美海蓬子的胁迫。

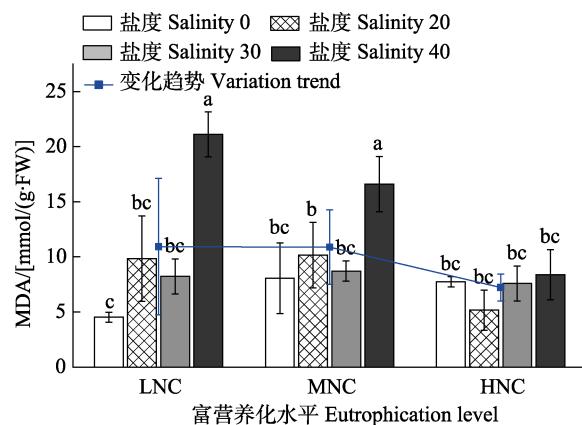


图 7 不同处理条件下北美海蓬子植株中的 MDA 含量

Fig.7 MDA content of *S. bigelovii* plants under different treatment conditions

3 讨论

北美海蓬子作为一种典型的盐生植物, 其生长需要有一定的盐度, 但在超过其盐度耐受范围环境下也会被抑制(Homayouni *et al.*, 2024), 其生长特性也体现了对盐度环境的独特适应性。植物形态特征变化是盐胁迫的综合体现, 也是评价植物耐盐性的首要指标(Lum *et al.*, 2020)。本研究发现, 在 0、20、30 3 个盐度水平下, 北美海蓬子展现出较强的生长适应性, 无论是从外部形态特征还是鲜重与干重积累量, 北美海蓬子的生长整体没有明显差异, 适度盐度(20、30)下更有利于其茎节分化。而在高盐(40)处理与无盐对照组相比, 尤其是在低营养盐(LNC 组)条件下, 明显抑制了北美海蓬子地上部生长高度和腋芽分化, 茎节虽受抑制, 但作用较小。其他研究也有相似的现象, 如胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)在较高盐浓度($\geq 200 \text{ mmol/L NaCl}$, 约 11.8)胁迫下, 幼苗总生物量、株高与 $<100 \text{ mmol/L}$ (约 5.9)盐浓度处理相比显著降低, 说明较高盐浓度对胀果甘草的生长性状具有显著影响(陆嘉惠等, 2013)。在逆环境下通常利用 MDA 含量推测植株的受伤程度和抗逆性(Leslie *et al.*, 2023)。本研究中, 低中营养盐水平下, 盐度 40 水平下 MDA 含量显著高于 0~30 盐度水平, 说明与盐度 40 相比, 盐度 0、20、30 不会对北美海蓬子产生胁迫效应, 由此可推断 0~30 盐度范围为北美海蓬子最适生长范围。北美海蓬子应对盐胁迫的方式可以通过自我调节, 首先叶片肉质化程度提高, 将盐离子积累到肉质化叶片(王丽燕等, 2004)以及绿色液泡中(高永生等, 2003), 减少盐离子的毒害; 其次细胞合成渗透调节物, 增强渗透调节能力, 以保证细胞水分正常供应(王丽燕, 2006); 同时提高抗氧化酶活性, 清除活性氧自由基, 减少对细胞的损害(段代祥, 2009)。而在 40 盐度胁迫下(Zhang *et al.*, 2013), 首先表现为渗透胁迫, 影响植物的水分吸收并且持续存在; 紧接着表现为离子平衡失调引起的细胞代谢功能紊乱和限制植物根系对营养的吸收; 最后引起氧化胁迫, 使植物细胞产生更多的活性氧自由基, 破坏细胞膜, 导致膜透性改变、扰乱生理生化代谢和有毒物质的积累, 最终影响植物的形态建成和生长。

高营养盐浓度下, 高盐度(40)抑制对北美海蓬子生长概况基本无显著性影响, 说明营养盐浓度的升高能够缓解高盐胁迫效应及削弱不同盐度对北美海蓬子生长造成的差异, 并且盐度 40 与其他盐度相比, MDA 含量无显著性差异, 且营养盐浓度升高促进了叶绿素合成。有研究表明, 与全海水浇灌相比较, 使

用 1:1 海水养殖废水浇灌海蓬子与碱蓬, 可以很大程度替代肥料施用, 加快 2 种植物的生长, 降低 MDA 积累量, 减少细胞膜受损(刘伟成等, 2019)。高营养盐的促进作用可能是因为养殖尾水中不仅含有丰富的氮磷、同时还含有 Fe、Cu、Zn、Si 等植物生长所需要的微量元素, 补充适合的营养元素有利于植物生长。已有研究表明, 对种植草地早熟禾(*Poa pratensis*)含有 Na^+ 的土壤中添加硅时, 植株的含水量提高了 7.3%, 同时植物的光合效率、 CO_2 同化效率等也得到了显著的提高(Zhang *et al.*, 2010)。

海水养殖尾水对北美海蓬子的作用是其中营养元素的多少与盐度的高低 2 个小单元交叉组合进行交互产生的影响。从研究结果可知, 少量的营养盐(LNC)添加不会对北美海蓬子的生长发育产生大的影响, 而随着营养盐的添加, 盐分对北美海蓬子的促进或是抑制作用会叠加出不同的生长趋势类型, 但综合各个生长发育指标来看, 0~30 盐度范围不会抑制北美海蓬子的生长, 而过高盐度是北美海蓬子生长的主要限制因子, 营养盐的添加是北美海蓬子生长的促进因子, 并且可以缓解盐胁迫的抑制作用。

海水养殖尾水的主要特质是高盐度效应, 而大多对污染水体具有良好修复效果的水生植物耐盐性较差, 无法在海水养殖尾水中生长。相较于其他耐盐植物, 北美海蓬子不仅能够在 30 盐度下正常生长, 同时, 刘伟成等(2019)研究表明, 与碱蓬相比, 北美海蓬子能在盐度及污染物浓度频繁波动的海水养殖尾水环境中展现出良好的适应性。已有研究表明, 利用浮床模式, 在浮床覆盖度为 50% 时, 北美海蓬子不仅能有效吸收水体中的营养物质, 减轻水体富营养化, 还能通过其茂密的植被覆盖为养殖生物提供遮蔽与栖息地, 促进生态系统的平衡与稳定, 显著提升养殖生物的产量(吴英杰等, 2018), 并且植株具有明显的生长(罗梓峻等, 2024)。因此, 将北美海蓬子作为环境友好型污水处理技术的核心资源, 不仅有助于缓解海水养殖尾水直接排放对海洋环境的压力, 还能促进农业与水产养殖业的可持续发展, 实现经济效益与生态效益的双赢。

本研究从北美海蓬子对盐度与营养盐变化及组合效应的影响, 深入剖析北美海蓬子作为工具种处理海水养殖尾水的潜在效能, 揭示了其独特的生态适应性, 为养殖尾水的资源化利用与生态修复提供了新思路。在实际应用中, 通过精准调控尾水的理化性质, 特别是营养盐与盐度水平, 可以同步实现尾水的有效净化与经济耐盐植物的培育, 从而在保护海洋生态环境的同时, 促进农业经济的可持续发展。

4 结论

营养盐浓度升高促进了北美海蓬子地上部高度、腋芽与分支数量、茎节分化数量、叶绿素含量和干重与鲜重积累量的增加, 说明北美海蓬子对高营养盐环境的显著偏好与适应性, 并且高营养盐浓度不仅可以缓解高盐(40)对植株生长的抑制作用, 同时促进了叶绿素合成。北美海蓬子地上部高度生长、腋芽与分支数以及鲜重干重积累量的变化表明其能够耐受高达30的极端盐度条件, 而在盐度40条件下抗逆性大幅度增强, 受到明显抑制, 在20~30盐度下更有利于其茎节分化, 因此, 满足了海水养殖尾水处理过程中植株对高盐环境的耐受需求。

参 考 文 献

- DUAN D X. Research progress on salinity resistance of *Salicornia bigelovii*. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(23): 10982–10983 [段代祥. 海蓬子抗盐性研究进展. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 10982–10983]
- FAN Z, HU H B, LIAN J W, et al. Salt tolerance and water purification effects of several wetland plant species. *Yangtze River*, 2019, 50(10): 56–62 [范真, 胡海波, 连经纬, 等. 几种湿地植物的耐盐性与净化水质效果研究. 人民长江, 2019, 50(10): 56–62]
- GAO Y S, WANG S M, ZHANG C L. Plant adaptive and regulatory mechanism under salt stress. *Acta Pratacultural Science*, 2003(2): 1–6 [高永生, 王锁民, 张承烈. 植物盐适应性调节机制的研究进展. 草业学报, 2003(2): 1–6]
- GUO F, ZHAO J, CHEN J F, et al. Nitrogen and phosphorous pollution in shellfish culture areas of Jiaozhou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(5): 116–122 [过锋, 赵俊, 陈聚法, 等. 胶州湾贝类养殖区氮、磷污染现状及动态变化. 渔业科学进展, 2012, 33(5): 116–122]
- HERBECK L S, UNGER D, WU Y, et al. Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China. *Continental Shelf Research*, 2013, 57: 92–104
- HOMAYOUNI H, RAZI H, IZADI M, et al. Temporal changes in biochemical responses to salt stress in three *Salicornia* species. *Plants*, 2024, 13(7): 979
- KASHEM A H M, DAS P, HAWARI A H, et al. Aquaculture from inland fish cultivation to wastewater treatment: A review. *Reviews in Environmental Science and BioTechnology*, 2023, 22(4): 969–1008
- LESLIE H F, GERARDO V J, LAZARO H, et al. Soluble phenolics, chlorophylls, and malondialdehyde are the best indicators of salt stress in *Eichornia crassipes*. *Vegetos*, 2023, 37(3): 1195–1201
- LI C, MA L M, ZONG C, et al. Preliminary study on in-situ treatment effect of three kinds of aquaculture tail water. *China Fisheries*, 2024(7): 31–33 [李超, 马立鸣, 宗超, 等. 三种养殖尾水原位处理效果初步研究. 中国水产, 2024(7): 31–33]
- LI H S. *Experimental principle and technique for plant physiology and biochemistry*. Beijing: Higher Education Press, 2000 [李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000]
- LIU W C, FAN C Z, GAN C D, et al. Physiological characteristics and comparison of different halophytic economic plant under mariculture wastewater irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 253–262 [刘伟成, 范翠枝, 甘淳丹, 等. 海水养殖废水浇灌下不同盐生经济植物生理特征及其比较. 水土保持学报, 2019, 33(1): 253–262]
- LU J H, LÜ X, LIANG Y C, et al. Salt tolerance of *Glycyrrhiza inflata* seedlings in Xinjiang and its ion response to salt stress. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(9): 839–850 [陆嘉惠, 吕新, 梁永超, 等. 新疆胀果甘草幼苗耐盐性及对NaCl胁迫的离子响应. 植物生态学报, 2013, 37(9): 839–850]
- LUM T D, BARTON K E. Ontogenetic variation in salinity tolerance and ecophysiology of coastal dune plants. *Annals of Botany*, 2020, 125(2): 301–314
- LUO Z J, LI Q F, TIAN W J, et al. Study on purification effect of ecological floating bed of *Salicornia europaea* for eutrophic seawater. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(4): 548–555 [罗梓峻, 李秋芬, 田文杰, 等. 海蓬子(*Salicornia europaea*)生态浮床对富营养化海水的净化效果研究. 生态与农村环境学报, 2024, 40(4): 548–555]
- MOZDER T J, ZIEMAN J C, MCGLATHERY K J. Nitrogen uptake by native and invasive temperate coastal macrophytes: Importance of dissolved organic nitrogen. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(3): 784–797
- NARAYANASAMYDAMODARAN S, KUMAR N, ZUO J, et al. The role of plant uptake in total phosphorous and total nitrogen removal in vegetated bioretention cells using vetiver and cattail. *Chemosphere*, 2024, 143276
- PORCHAS M M, CORDOVA L R M. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. *The Scientific World Journal*, 2012, 389623
- ROBERTA C, DIANAMARIA M, SARA G, et al. Recovery from salinity and drought stress in the perennial *Sarcocornia fruticosa* vs. the annual *Salicornia europaea* and *S. veneta*. *Plants*, 2022, 11(8): 1058
- WANG C Y, GUO W C, YANG N, et al. Application of halophyte *Suaeda salsa* in remediation of eutrophic mariculture tail water. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(6): 81–85 [王趁义, 郭炜超, 杨娜, 等. 盐生植物碱蓬在富营养化海水养殖尾水修复中的应用. 水生态学杂志, 2019, 40(6): 81–85]
- WANG L Y, ZHAO K F. Effect of NaCl stress on ion compartmentation, photosynthesis and growth of *Salicornia*

- bigelovii* Torr. *Acta Photophysiologica Sinica*, 2004, 30(1): 94–98 [王丽燕, 赵可夫. NaCl 胁迫对海蓬子(*Salicornia bigelovii* Torr.)离子区室化、光合作用和生长的影响. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(1): 94–98]
- WANG L Y. Salt Stress affects photosynthesis and ultrastructure of chloroplast of *Salicornia bigelovii* Torr. and *Zea mays*. *Journal of Dezhou University*, 2006(3): 91–95 [王丽燕. 盐胁迫对海蓬子、玉米光合速率和叶绿体超微结构的影响. 德州学院学报, 2006(3): 91–95]
- WU Y J, MA L Y, CHEN C, et al. Purification of aquaculture seawater and stimulation of shrimp yield by *Salicornia bigelovii* ecological floating beds. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(12): 3351–3361 [吴英杰, 马璐瑶, 陈琛, 等. 北美海蓬子生态浮床对养殖海水的净化和对虾的增产效果. 环境工程学报, 2018, 12(12): 3351–3361]
- XU X G, ZHOU Y, HAN R, et al. Eutrophication triggers the shift of nutrient absorption pathway of submerged macrophytes: Implications for the phytoremediation of eutrophic waters. *Journal of Environmental Management*, 2019, 239: 376–384
- XU X L, LU X X, LEI X D, et al. Effects of hydrophytes on removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 30(1): 8–14 [徐秀玲, 陆欣欣, 雷先德, 等. 不同水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 30(1): 8–14]
- XU Y H, CUI Z G, QU K M, et al. Purification efficiency of mariculture wastewater in constructed wetlands with two salt-tolerant plants. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 80–88 [许永辉, 崔正国, 曲克明, 等. 不同耐盐植物人工湿地净化养殖外排水效果. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 80–88]
- XU Y D, WEI X, LI J H, et al. Characteristics of environment parameters and eutrophication assessment of seawater in Laizhou Bay in spring and summer 2013. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(6): 63–69 [徐艳东, 魏潇, 李佳蕙, 等. 2013 年春夏季莱州湾海水环境要素特征和富营养化评估. 中国环境监测, 2016, 32(6): 63–69]
- ZENG B J, YUE X C, LI Z F, et al. Effect of ecological floating bed on zooplankton community structure in amariculture pond. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(2): 354–359 [曾碧健, 岳晓彩, 黎祖福, 等. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘浮游动物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 354–359]
- ZHANG J L, SHI H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance. *Photosynthesis Research*, 2013, 115(1): 1–22
- ZHANG J Q, CHAI Q, SHAO X. Silicon effects on *Poa pratensis* responses to salinity. *HortScience*, 2010, 45(12): 1876–1881
- ZHOU Z X, YU R C, ZHOU M J. Evolution of harmful algal blooms in the East China Sea under eutrophication and warming scenarios. *Water Research*, 2022, 221: 118807

(编辑 陈 辉)

The Adaptability of *Salicornia bigelovii* to Salinity and Nutrient Levels in Aquaculture Effluent

CHI Saisai^{1,2}, LI Qiufen^{2①}, LUO Zijun², SUN Bo², TIAN Wenjie²,
MA Ying², DONG Zhiguo¹, CUI Zhengguo²

(1. College of Marine Science and Fisheries, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, China;
2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract The rapid development of mariculture has resulted in the direct discharge of untreated nutrient-rich effluents containing organic matter, inorganic nitrogen, phosphorus, and other nutrients into the ocean, which can lead to eutrophication, causing excessive algae growth, disrupting marine ecological balance, and presenting serious threats to coastal ecosystems. Therefore, the effective treatment and resource utilization of aquaculture effluents have become urgent considerations. The current methods for treating aquaculture effluents include physical, chemical, and biological approaches. Biological treatment, particularly using plants, is widely used owing to its environmental friend nature. Plants can absorb

① Corresponding author: LI Qiufen, Email: liqf@ysfri.ac.cn

nutrients such as nitrogen and phosphorus from water, thereby facilitating the degradation and treatment of pollutants. Therefore, using nutrient-rich aquaculture effluents for plant irrigation reduces environmental pollution and cultivates economically viable halophytes, maximizing resource utilization. However, the high salinity of mariculture effluents limits the use of traditional terrestrial plants, making the selection and cultivation of halophytes that can thrive in high-salinity environments a notable research topic. Although various halophytes have demonstrated efficacy in the treatment of mariculture effluents, their salinity tolerance range is often below that of natural seawater, with some plants presenting ecological risks or having poor regional adaptability. Therefore, *Salicornia bigelovii*, known for its unique salt tolerance, broad ecological adaptability, and economic value, has attracted considerable attention. This study aimed to explore the adaptability and potential of *S. bigelovii* in treating aquaculture effluents by analyzing its growth and physiological-biochemical responses under different nutrient concentrations and salinity conditions. Through a cross-experiment with four salinity levels (0, 20, 30 and 40) and three eutrophication levels (LNC: low nutrient concentration, MNC: moderate nutrient concentration, and HNC: high nutrient concentration) over 60 days, we monitored the growth indices (aboveground height, number of nodes, number of axillary buds and branches, and biomass) and physiological-biochemical indices (chlorophyll content, and MDA content) of *S. bigelovii* to analyze its adaptability to different mariculture effluents. The results showed that, under medium-low nutrient levels, *S. bigelovii* exhibited strong growth adaptability within the 0–30 salinity range. Its aboveground growth height, number of axillary buds and branches, node number, and fresh and dry weight accumulation were significantly higher than those at 40 salinity level ($P<0.05$). Additionally, 20 and 30 salinity levels were more conducive to node differentiation, indicating that *S. bigelovii* can effectively cope with moderate salt stress environments through self-regulation mechanisms and maintain stable growth patterns. When the salinity reached 40, the MDA content was significantly higher than those of other salinity levels ($P<0.05$), indicating substantial significant stress, suggesting that its salt endurance is limited despite having good salt tolerance. Moreover, increasing nutrient concentrations effectively reduced the impact of various salinity levels on the differential growth of *S. bigelovii* and mitigated the stress effects at 40 salinity while promoting chlorophyll synthesis. This indicates that *S. bigelovii* is adaptable to high-nutrient environments and can effectively absorb and utilize nutrients from aquaculture effluents. Additionally, under combined high-nutrient and high-salinity (40) treatments, *S. bigelovii*'s growth indices remained relatively stable, and MDA levels did not significantly increase, although some effect was observed. This further confirmed the important role of increased nutrient concentrations in enhancing plant resistance and survival ability under high-salinity conditions. The reasons may be that under high-salinity stress, *S. bigelovii* adopted multiple physiological and biochemical responses: Increasing leaf succulence to accumulate salt ions in succulent leaves and green vacuoles, thereby reducing salt ion toxicity; synthesizing osmotic regulatory substances to enhance osmotic regulation capacity, ensuring normal water supply to cells, synthesizing and accumulating osmotic protectants to enhance cell osmotic regulation and maintain water balance; and increasing antioxidant enzyme activity to scavenge reactive oxygen species, thus reducing cellular damage. The mitigation of stress effects with increased nutrient concentrations may be due to the presence of abundant nitrogen, phosphorus, and trace elements such as iron, copper, zinc, and silicon in the effluents, which are beneficial for plant growth. Consequently, *S. bigelovii* can be used as a phytoremediation plant for treating high-salinity eutrophic mariculture effluents and has the potential for large-scale promotion as a salt-tolerant economic plant.

Key words Salt-tolerant plants; *Salicornia bigelovii*; Maricultural effluent; Salt stress; Eutrophication