第 40卷 第 7期
2007年 7月

天 津 大 学 学 报
Journal of Tianjin University

Vol 40 No. 7
Jul 2007

川蔓藻和蓖齿眼子菜对再生水中盐度的响应机制

王卫红[1,2], 季 民[2], 薛玉伟[2]
(1. 天津大学建筑学院,天津 300072; 2. 天津大学环境科学与工程学院,天津 300072)

摘 要: 通过在不同盐度再生水中培养川蔓藻和蓖齿眼子菜,研究了它们的生物量、光合强度及其组织中的脯氨酸、丙二醛、过氧化氢酶和叶绿素的含量变化对再生水中盐度的响应.结果表明:不同盐度下川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中累积的脯氨酸含量随时间呈指数增长;当盐度为 10.07 g/L时,蓖齿眼子菜的丙二醛的含量显著上升,而过氧化氢酶的含量明显下降($p<0.05$),氧自由基产生和消除之间的平衡被破坏;当盐度超过 7.72 g/L时,川蔓藻和蓖齿眼子菜中叶绿素和叶绿素 a/b值均显著下降,但川蔓藻能通过增加叶绿素 b来补偿盐度对光合作用效率的影响.川蔓藻和蓖齿眼子菜均能通过调节自身的脯氨酸代谢和抗氧化系统来抵抗再生水中盐度的胁迫,且川蔓藻在高盐胁迫下具有较好的清除氧自由基能力.

关键词: 川蔓藻; 蓖齿眼子菜; 盐度; 再生水; 脯氨酸; 丙二醛; 过氧化氢酶; 叶绿素
中图分类号: X321; Q945.78 **文献标志码**: A **文章编号**: 0493-2137(2007)07-0804-07

Response Mechanism of Ruppia Maritima and Potamogeton Pectinatus to Salinity in Reclaimed Wastewater

WANG Wei-hong[1,2], JI Min[2], XUE Yu-wei[2]
(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The biomass photosynthesis activity of *Ruppia maritima* and *Potamogeton pectinatus* and the proline, malondialdehyde (MDA), catalase (CAT), and chlorophyll contents in their leaf-tissues in response to salinity were studied by investigating the plants cultured with reclaimed wastewater of different salinities The results show that proline content in tissues of *R. maritima* and *P. pectinatus* increases exponentially with time at different salinities When the salinity is 10.07 g/L, MDA content in tissues of *P. pectinatus* increases significantly but catalase content decreases significantly ($p<0.05$), and the balance between producing and removing of free oxygen radicals is damaged When the salinity exceeds 7.72 g/L, the chlorophyll and chlorophyll a/b value in *R. maritima* and *P. pectinatus* decrease, but *R. maritimcan* counteracts salinity impact on photosynthesis efficiency through increasing chlorophyll b. All these results imply that *R. maritima* and *P. pectinatus* can both resist the salt stress through adjusting their own proline metabolism and inoxidizable system, and *R. maritima* has better ability to remove free oxygen radicals in high-salt stress

Keywords: *Ruppia maritima; Potamogeton pectinatus*; salinity; reclaimed wastewater; proline; malondialdehyde (MDA); catalase (CAT); chlorophyll

利用再生水恢复与重建滨海景观湿地,控制景观水体的富营养化是关键.沉水植物的恢复与重建已成为控制和治理湖泊富营养化的一种重要生物措施[1−3].沉水植物的恢复与重建受到多种生态因子的

收稿日期: 2006-11-17; 修回日期: 2007-03-08.
基金项目:国家 863攻关课题“天津市滨海新区水环境质量改善技术与综合示范”资助项目(2003AA601030).
作者简介:王卫红(1968—),女,博士, red_wangwei@163.com.
通讯作者:季 民, jimin@tju.edu.cn.

影响,确定主导生态因子是恢复成功的关键[2],这需要对物种的生物学特性有充分的了解,然后积极创造适宜的生态环境.天津滨海新区再生水景观河道使用污水处理厂二级出水和新水源一厂连续微滤(CMF)出水作为景观河道唯一水源,河道底质为典型的氯化钠型滨海沼泽盐土[3].由于河道底泥盐度(31 783 mg/kg)远远高于再生水的盐度(2.88～3.56 g/L),因此在河道注入再生水进行修复的初期,河道水体盐度变化就会出现先逐渐升高然后逐渐降低,直到底泥盐量的溶出最终会同再生水体的盐度达到一个动态平衡.这样对先锋植物的要求不仅耐盐而且必须能耐受盐度变化的冲击.大量研究表明[4-6],频繁的盐度波动是造成河口沉水植被衰退的主要原因之一.因此盐度变化成为再生水景观河道水生植物重建的最主要的限制因子.目前,国内对沉水植物的耐盐性研究文献极少,而国外由于较早开展海岸带湿地的生态修复,在盐度对河口沉水植被的种类结构影响方面做了大量研究[4-8].但研究沉水植物如何通过调节生理代谢来响应盐度变化的文献较少.含盐再生水毕竟不同于自然的河口水体.因此了解我国河口海岸带湿地中的耐盐沉水植物川蔓藻(*Ruppia maritima*)和蓖齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)如何对再生水中盐度响应,不仅进一步了解它们的耐盐性,而且为以含盐再生水为水源的河道引种以及修复后的管理提供生态生理学依据.

1 实验部分

1.1 实验材料

川蔓藻和蓖齿眼子菜采自天津滨海新区再生水河道旁边一个水洼地中(水体盐度3.15 g/L).含盐再生水(盐度2.88 g/L)取自天津滨海新区再生水河道入水口处.底泥(盐度31 783 mg/kg)取自天津滨海新区再生水河道.

1.2 实验方法

1.2.1 川蔓藻和蓖齿眼子菜的生物量对不同盐度再生水的响应实验

2004年4月到6月之间,将野外采集的两种沉水植物川蔓藻和蓖齿眼子菜带其生长底泥移植在直径为8～10 cm的小花盆中(每盆1～2株,每种5～6盆),先后置于室外的3个120 L高0.6 m的塑料缸中培养,每缸内加100 L取自河道进水口处的再生水(盐度变化范围2.88～4.27 g/L),每日蒸发量用再生水补充.观察一周后,将一部分生长较好的植物洗去原底泥,称鲜重后移植到底层铺10 cm厚的河道土塑料缸中,3周后取出植株洗净称重.将另一部分生长较好的植株洗去原底泥,称鲜重后移植到装砾石和细沙的8～10 cm的小花盆中,仍置于室外的3个塑料缸中培养,加NaCl调节3个缸中再生水体盐度到5 g/L左右.3周后换河道水,加NaCl调节盐度为7.5 g/L左右.再3周后换河道水,加NaCl调节盐度为10 g/L左右.3周后将植株取出洗净称重.在实验期间每隔2天测缸内水的盐度并及时补充盐或水来保持缸内水体盐度相对稳定.

使用软件Excel和SPSS11.5进行数据处理与相关性分析检验.

川蔓藻的相对生长速率(relative growth rate) RGR的计算公式[7]为

$$\mathrm{RGR}=\frac{\ln B_{\mathrm{f}}-\ln B_{\mathrm{i}}}{T} \tag{1}$$

式中:RGR表示每天每克沉水植物的生长量,g(DW)/(g·d),DW为干重;B_{f}为实验结束时生物量,g(DW);B_{i}为实验开始时生物量,g(DW);T为实验周期,d.

1.2.2 川蔓藻和蓖齿眼子菜在不同盐度再生水中的光合放氧量实验

参照金送笛[8]方法测定与计算.即将上述4个盐度水平的再生水分别装入200 mL溶解氧瓶中,每个瓶中装1 g川蔓藻,加盖水封.设3个平行对照,每种盐度设1个空白对照,然后将溶解氧瓶在上午10:00置于室外120 L塑料水箱中,水面距离瓶盖的高度为30 cm,1 h后取出测定水中溶解氧浓度.

1.2.3 川蔓藻和蓖齿眼子菜对不同盐度再生水的生理响应实验

2004年6月初将采自河道入水口处的川蔓藻培养在室外120 L塑料箱中,一周后将生长出有一枝叶子的新芽连同根一起切下,用流动的自来水清洗表面附生藻类,再置于装500 mL蒸馏水的三角瓶中震荡清洗.然后悬浮培养在经0.22 μm过滤的再生水中,培养条件为光照强度5 000 lx,光暗比16 h/8 h,温度20～25 ℃.培养3周后,取新发出的长10 cm左右的无性分株(ramets)用于实验.

将取自河道的再生水(盐度3.16 g/L)和加NaCl调成3个不同的盐度梯度的再生水分别装入4个3 L的大烧杯,盐度分别是3.16 g/L、5.10 g/L、7.72 g/L和10.07 g/L,每个烧杯中装2 L水并放入10 g川蔓藻,均设3个平行对照.以相同方法处理蓖齿眼子菜.置于室内大型光照培养箱中.培养条件:光照强度5 000 lx,光暗比12 h/12 h,温度(23 ±2) ℃.实验进行两周,在第2天、第7天和第14天的上午9:00取植株相同部位的叶

片,用蒸馏水洗净、擦干、称量,然后测定叶绿素、丙二醛、脯氨酸和过氧化氢酶 4种生理指标[9].

2 实验结果与分析

2.1 川蔓藻和篦齿眼子菜的生物量对不同盐度再生水的响应

沉水植物川蔓藻和篦齿眼子菜在植入河道底泥中的 3周内生物量增长较小,见图 1.川蔓藻的生物量由初始干重 5.261 g ±0.012S.D增长为 7.925 g ±0.324S.D,相对生长速率为 0.015 g (DW) / (g · d) ±0.006S.D;篦齿眼子菜的生物量由初始干重 5.733 g ±0.027S.D增长为 6.941 g ±0.630S.D,相对生长速率为 0.007 g(DW) / (g · d) ±0.004S.D (S.D为标准差).

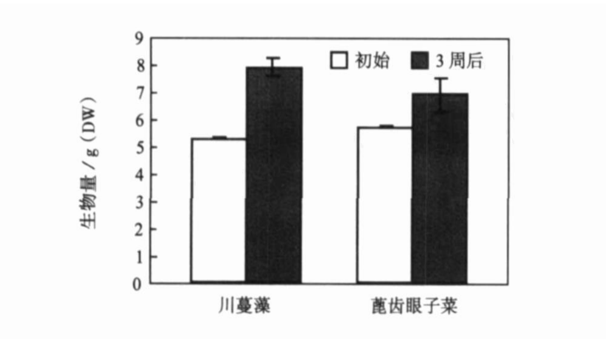

图 1 有底泥培养前后川蔓藻和篦齿眼子菜生物量的变化

Fig. 1 Biomass changes of *Ruppia maritima* and *Potamogeton pectinatus* with river sediment culture

使用无河道底泥的水培方法,川蔓藻和篦齿眼子菜在 9周内的生物量增加显著,见图 2.川蔓藻的生物量由初始干重 5.643 g ±0.531S.D增长为 29.094 g ±1.035S.D,相对生长速率为 0.026 g(DW) / (g · d) ±0.034S.D;篦齿眼子菜的生物量由初始干重 6.047 g ±0.439S.D增长为 15.91 g ±1.274S.D,相对生长速率为 0.015 g (FW) / (g · d) ±0.019S.D, FW为湿重.

两种培养方法使川蔓藻和篦齿眼子菜的平均比生长速率有了显著差异 ($p < 0.05$),有河道底泥盐分不断溶出的培养方式显著抑制了川蔓藻和篦齿眼子菜的生长.这是由于底泥盐分的不断溶出使再生水体中盐度频繁改变,对植株体造成了持续渗透胁迫的缘故.这与 Megan等[7]研究脉冲式的盐度变化显著抑制川蔓藻的生长结论是一致的.比较两种培养方式下川蔓藻和篦齿眼子菜的相对生长速率可以看出,川蔓藻比篦齿眼子菜更耐盐.

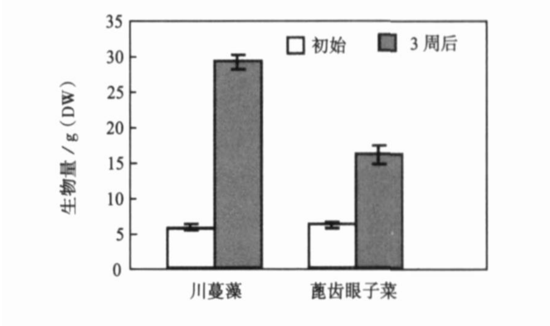

图 2 无底泥水培前后川蔓藻和篦齿眼子菜生物量的变化

Fig. 2 Biomass changes of *Ruppia maritima* and *Potamogeton pectinatus* with hydroponic culture

2.2 不同盐度对川蔓藻和篦齿眼子菜光合放氧速率的影响

随着盐度的增加,川蔓藻和篦齿眼子菜的光合放氧速率下降,见表 1,尤其是篦齿眼子菜的光合放氧速率在最高盐度 (10.07 g/L)下只有最低盐度 (3.16 g/L)的 28.9%;川蔓藻的光合放氧速率下降到最低盐度时的 49.9%.同等盐度下相比,川蔓藻的光合放氧速率在最低盐度时与篦齿眼子菜的光合放氧速率没有显著差别 ($p > 0.05$),而在盐度为 5.10 g/L以上则显著高于篦齿眼子菜的光合放氧速率 ($p < 0.01$),说明川蔓藻比篦齿眼子菜耐盐性强.

表 1 不同盐度下川蔓藻和篦齿眼子菜的光合放氧速率

Tab. 1 Oxygen releasing speed of *Ruppia maritima* and *Potamogeton pectinatus* through photosynthesis under different salinities

盐度 / (g · L^{-1})	川蔓藻光合放氧速率 / (mg · (g(FW) · h)$^{-1}$)	篦齿眼子菜光合放氧速率 / (mg · (g(FW) · h)$^{-1}$)
3.16	1.766 ±0.093	1.520 ±0.044
5.10	1.524 ±0.052	0.943 ±0.046
7.72	1.334 ±0.052	0.630 ±0.036
10.07	0.882 ±0.051	0.440 ±0.028

2.3 川蔓藻和篦齿眼子菜对不同盐度再生水的生理响应实验结果

2.3.1 不同盐度下川蔓藻和篦齿眼子菜组织中脯氨酸含量的变化

植物生长环境中过量的盐分离子对植物造成的胁迫称为盐分胁迫,也叫盐害.盐害主要通过生理干旱、离子毒害和养分失调来影响植物正常生长,通过破坏生物膜的结构、对酶钝化和对营养元素拮抗等方式进行毒害作用[10].植物对盐害的响应机制之一就是迅速产生小分子相溶性有机物来调节渗透胁迫[11].其中脯氨酸是许多植物在盐胁迫下产生的比较广泛的相溶性

小分子有机物质. 盐害下累积脯氨酸有利于渗透压的调节,提高耐盐性[12]. 川蔓藻和蓖齿眼子菜在盐度最低的处理组中,其组织中脯氨酸的含量基本随时间没有明显的变化,这是由于其处理前原培植水体盐度与 3.16 g/L 相近的缘故,即生长中盐度基本没变. 在其他 3个盐度下,川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中脯氨酸的含量都随着盐度的增加而增加,而且都随着处理时间的延长而增加,但增加的大小不同,脯氨酸积累的速度也不同. 在盐度最大时,处理第 14天的脯氨酸川蔓藻累积量达 30.04 μg/g(FW),是初始 8.653 μg/g(FW)的 3.472倍;而蓖齿眼子菜的累积达到 57.02 μg/g(FW),是初始 6.794 μg/g(FW)的 8.393倍.

不同盐度下川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中脯氨酸的含量随时间累积的变化趋势见图 3和图 4. 脯氨酸的含量 (y)随时间 (x)累积的变化呈指数增长趋势,回归通式为

$$y = ae^{bx} \tag{2}$$

式中: b值反映了脯氨酸累积速度的差异, b值越大,累积速度越快. 通过比较可以看出,川蔓藻在每个盐度下的脯氨酸随时间累积 b值均小于蓖齿眼子菜的累积 b值. 在最高盐度处理组中,蓖齿眼子菜的 b值 0.717 7是川蔓藻的 b值 0.431 1的 1.665倍. 实验结果说明川蔓藻和蓖齿眼子菜都能通过迅速累积组织中脯氨酸来对抗盐度胁迫,但盐胁迫对蓖齿眼子菜的渗透影响较川蔓藻大,蓖齿眼子菜对盐胁迫的反应较川蔓藻敏感.

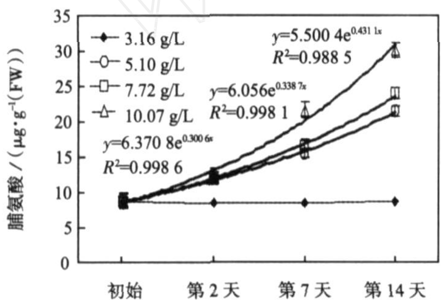

图 3　不同盐度下川蔓藻组织中脯氨酸随时间的累积变化趋势

Fig. 3　Proline content changes in tissues of *Ruppia maritima* with time under different salinities

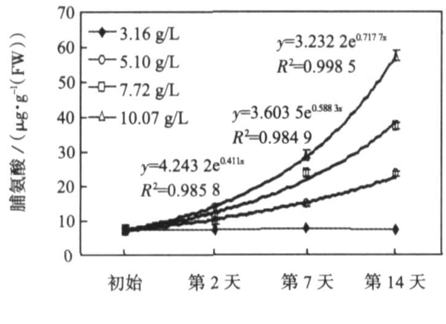

图 4　不同盐度下蓖齿眼子菜组织中脯氨酸随时间的累积变化趋势

Fig. 4　Proline content changes in tissues of *Potamogeton pectinatus* with time under different salinities

2.3.2　不同盐度下川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中丙二醛和过氧化氢酶的变化

在盐胁迫下,植物在叶绿体和线粒体内会产生大量的氧自由基,如过氧化氢 (H_2O_2)和氢氧基等,这些氧自由基对细胞膜有较强的氧化作用,致使膜质过氧化产物丙二醛 (MDA)含量上升,植物则通过提高一些酶的活性,如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶等来清除氧自由基[10]. 因此,在盐胁迫下清除氧自由基的能力也是检验植物对盐度响应的一个重要机制. 从图 5可以看出,不同盐胁迫使川蔓藻中丙二醛含量在处理后的第 2天普遍上升,但增幅较小,且保持在一个较低的水平,随后其丙二醛含量在处理后第 7天回落,到第 14天时已与初始含量相当. 说明川蔓藻清除氧自由基的酶活性随盐度增加而增加,这与不同盐度下川蔓藻过氧化氢酶 (CAT)的变化结果是一致的,见图 6. 川蔓藻组织中的过氧化氢酶在盐度处理为 3.16 g/L和 5.10 g/L下,只有很小的增幅,且变化较为平稳,在盐度为 7.72 g/L和 10.07 g/L处理下,过氧化氢酶随着处理时间延长而出现明显的升高趋势,在最大盐度 10.07 g/L处理的第 7天即上升到较高水平,在第 14天时只有微小增幅,高盐度下过氧化氢酶保持较高水平有利于氧自由基的清除,防止膜质过氧化. 经相关分析,在高盐度 10.07 g/L处理组中,川蔓藻的丙二醛含量降低与过氧化氢酶升高显著相关 ($p < 0.05$),说明了川蔓藻在盐胁迫下具有较好地清除氧自由基的能力.

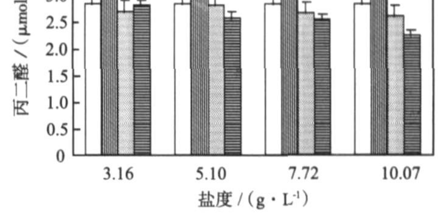

图 5　不同盐度下川蔓藻组织中丙二醛的变化

Fig. 5　MDA changes in tissues of *Ruppia maritima* with different salinities

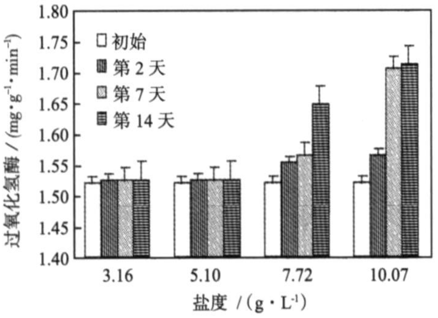

图 6 不同盐度下川蔓藻组织中过氧化氢酶的变化

Fig. 6 CAT changes in tissues of *Ruppia maritima* **with different salinities**

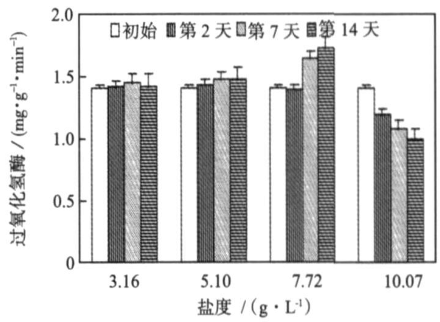

图 8 不同盐度下蓖齿眼子菜组织中过氧化氢酶的变化

Fig. 8 CAT changes in tissues of *Potamogeton pectinatus* **with different salinities**

蓖齿眼子菜组织中丙二醛的含量,除最高盐度处理组外,其他 3个盐度处理下丙二醛的变化与川蔓藻基本相同,见图 7,也在处理后的第 2天有小幅度的升高,上升大小随盐度的增加而增大,在第 7天回落并基本保持稳定;但在高盐度 10.07 g/L处理组中,蓖齿眼子菜丙二醛的含量随时间呈显著上升趋势($p<0.05$). 在第 14天丙二醛含量达 22.82 μmol/g (FW),是初始浓度 2.593 μmol/g (FW)的 8.8倍. 说明在盐度 10.07 g/L下,蓖齿眼子菜有明显的膜质过氧化胁迫特征. 经方差分析,盐度可显著影响蓖齿眼子菜的丙二醛含量($p<0.05$). 从图 8可以看出,蓖齿眼子菜在盐度为 3.16 g/L和 5.10 g/L处理下,过氧化氢酶的含量随处理时间有极小的上升,基本稳定,在盐度为 7.72g/L处理下,过氧化氢酶的含量随处理时间有明显的上升,但在盐度为 10.07 g/L处理下,过氧化氢酶的含量则随处理时间出现明显的下降,对应盐度下丙二醛的含量却随时间显著上升($p<0.05$),说明盐胁迫破坏了蓖齿眼子菜自由基产生和消除之间的平衡,可能积累过多的自由基,从前面蓖齿眼子菜的相对生长速率较小可以推出这是其生长受到明显抑制的原因.

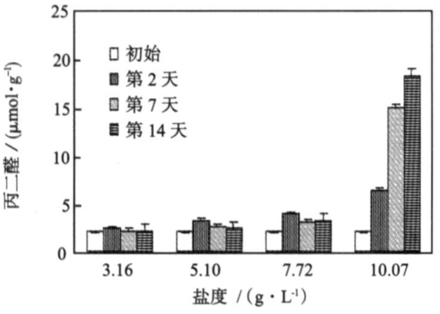

图 7 不同盐度下蓖齿眼子菜组织中丙二醛含量的变化

Fig. 7 MDA changes in tissues of *Potamogeton pectinatus* **with different salinities**

蓖齿眼子菜丙二醛和过氧化氢酶的初始含量均低于川蔓藻的,比较川蔓藻和蓖齿眼子菜在不同盐度处理下丙二醛和过氧化氢酶随时间的变化,说明在高盐胁迫下川蔓藻清除氧自由基的能力高于蓖齿眼子菜.

2.3.3 不同盐度下川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中叶绿素的变化

沉水植物光合色素含量差异不仅与其光合作用能力有明显的相关性,而且也反映出其生态分布不同水层的光质所产生的影响[13]. 不同的光合色素,对可见光(波长 380～760 nm)不同波长范围的光照利用能力不同[14]. 叶绿素 a的最大吸收在 440 nm附近的蓝区和 680 nm附近的红区,叶绿素 b、c及类胡萝卜素的最大吸收值位于 400～650 nm. 因而叶绿素 a在红光部分的吸收带偏向长光波方面,而叶绿素 b在蓝紫光部分的吸收带较宽,植物增加叶绿素 b的含量能够更加充分利用水下漫射的蓝紫光,从而使植物适应于环境胁迫造成的光合效率下降. 不同盐度下川蔓藻和蓖齿眼子菜组织中叶绿素随时间的变化见表 2和表 3.

在不同的盐度下,川蔓藻和蓖齿眼子菜的叶绿素变化有明显不同. 在盐度为 3.16 g/L时,两种植物的叶绿素随时间基本没有变化,说明此盐度对两种沉水植物的光合作用均没有影响. 在盐度为 5.10 g/L处理下,川蔓藻的叶绿素 a+b、叶绿素 a和叶绿素 b均随时间逐渐增加,叶绿素 a/b值也从初始 2.631增加到 2.887,说明川蔓藻在此盐度下光合作用较强. 而在此盐度下,蓖齿眼子菜的叶绿素 a+b、叶绿素 a和叶绿素 b均随时间先增加后于第 7天降低,但叶绿素 a/b值则随时间降低,即从 2.487降到 2.180. 在盐度 7.72 g/L处理下,川蔓藻和蓖齿眼子菜的叶绿素 a+b和叶绿素 a都是在第 2天升高,然后下降,蓖齿眼子菜较川蔓藻下降快;而叶绿素 b则变化趋势不一致,川蔓藻的叶绿素 b呈缓升,蓖齿眼子菜的叶绿素 b呈缓降,叶绿素 a/b值均为下降,也是蓖齿眼子菜较川蔓藻下降快.

说明在此盐度下,两种植物的光合作用效率均下降,盐度对蓖齿眼子菜的光合作用影响大一些.川蔓藻则能通过增加叶绿素 b来补偿光合作用效率,也间接说明川蔓藻对盐度的适应能力较强.在盐度 10.07 g/L处理下,川蔓藻和蓖齿眼子菜的叶绿素 a+b、叶绿素 a、叶绿素 b以及叶绿素 a/b值均随时间呈显著的下降趋势($p<0.05$),但蓖齿眼子菜的下降速度远快于川蔓藻.川蔓藻的叶绿素 a/b值从 2.631下降到 2.137,蓖齿眼子菜的叶绿素 a/b值从 2.487下降到 1.547.经方差检验,此盐度对蓖齿眼子菜的叶绿素影响显著($p<0.05$),说明此盐度对蓖齿眼子菜的光合作用效率产生显著影响;而此盐度对川蔓藻的叶绿素影响不显著($p>0.05$),说明川蔓藻的耐盐性较强.

表 2 不同盐度下川蔓藻组织中叶绿素的变化

Tab. 2 Chlorophyll changes in tissues of *Ruppia maritima* **with different salinities** mg/g(FW)

盐度/(g·L^{-1})	时间	叶绿素 a+b	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b
3.16	初始	1.323 0 ±0.051	0.958 6 ±0.039	0.364 4 ±0.017	2.631 ±0.089
	第 2天	1.330 9 ±0.017	0.960 4 ±0.017	0.370 5 ±0.013	2.593 ±0.069
	第 7天	1.328 1 ±0.025	0.958 1 ±0.024	0.370 0 ±0.011	2.589 ±0.064
	第 14天	1.336 4 ±0.044	0.972 1 ±0.060	0.364 3 ±0.016	2.668 ±0.051
5.10	初始	1.323 0 ±0.051	0.958 6 ±0.039	0.364 4 ±0.017	2.631 ±0.089
	第 2天	1.434 5 ±0.046	1.058 3 ±0.047	0.376 2 ±0.012	2.813 ±0.082
	第 7天	1.443 7 ±0.080	1.066 7 ±0.029	0.377 0 ±0.011	2.829 ±0.074
	第 14天	1.502 2 ±0.055	1.115 7 ±0.033	0.386 5 ±0.010	2.887 ±0.063
7.72	初始	1.323 0 ±0.051	0.958 6 ±0.039	0.364 4 ±0.017	2.631 ±0.089
	第 2天	1.453 9 ±0.047	1.068 2 ±0.043	0.385 7 ±0.015	2.780 ±0.060
	第 7天	1.399 4 ±0.060	1.017 3 ±0.025	0.382 1 ±0.012	2.662 ±0.065
	第 14天	1.369 1 ±0.046	0.979 1 ±0.033	0.390 0 ±0.011	2.511 ±0.073
10.07	初始	1.323 0 ±0.051	0.958 6 ±0.039	0.364 4 ±0.017	2.631 ±0.089
	第 2天	1.258 8 ±0.029	0.937 9 ±0.033	0.320 9 ±0.014	2.923 ±0.075
	第 7天	1.145 0 ±0.054	0.857 6 ±0.026	0.387 4 ±0.012	2.214 ±0.064
	第 14天	0.965 3 ±0.047	0.657 6 ±0.021	0.307 7 ±0.015	2.137 ±0.058

表 3 不同盐度下蓖齿眼子菜组织中叶绿素的变化

Tab. 3 Chlorophyll changes in tissues of *Potamogeton pectinatus* **with different salinities** mg/g(FW)

盐度/(g·L^{-1})	时间	叶绿素 a+b	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b
3.16	初始	1.593 4 ±0.071	1.136 4 ±0.033	0.457 0 ±0.013	2.487 ±0.062
	第 2天	1.637 3 ±0.044	1.161 9 ±0.035	0.475 4 ±0.011	2.444 ±0.055
	第 7天	1.621 3 ±0.051	1.173 0 ±0.041	0.448 3 ±0.016	2.617 ±0.047
	第 14天	1.631 3 ±0.045	1.162 0 ±0.045	0.469 3 ±0.011	2.476 ±0.067
5.10	初始	1.593 4 ±0.071	1.136 4 ±0.033	0.457 0 ±0.013	2.487 ±0.062
	第 2天	1.567 8 ±0.042	1.109 5 ±0.032	0.458 3 ±0.011	2.421 ±0.060
	第 7天	1.775 5 ±0.051	1.131 3 ±0.024	0.514 2 ±0.015	2.200 ±0.082
	第 14天	1.540 4 ±0.061	1.056 0 ±0.027	0.484 4 ±0.014	2.180 ±0.071
7.72	初始	1.593 4 ±0.071	1.136 4 ±0.033	0.457 0 ±0.013	2.487 ±0.062
	第 2天	1.690 6 ±0.054	1.210 2 ±0.039	0.480 4 ±0.014	2.519 ±0.071
	第 7天	1.622 1 ±0.050	1.143 1 ±0.044	0.479 2 ±0.017	2.385 ±0.089
	第 14天	1.294 3 ±0.041	0.826 8 ±0.052	0.467 5 ±0.015	1.769 ±0.074
10.72	初始	1.593 4 ±0.071	1.136 4 ±0.033	0.457 0 ±0.013	2.487 ±0.062
	第 2天	1.134 0 ±0.050	0.791 5 ±0.028	0.342 5 ±0.011	2.311 ±0.059
	第 7天	0.733 6 ±0.035	0.497 1 ±0.014	0.236 5 ±0.011	2.102 ±0.047
	第 14天	0.522 8 ±0.022	0.341 8 ±0.013	0.221 0 ±0.012	1.547 ±0.025

3　结　论

(1)盐度改变抑制了川蔓藻和菹齿眼子菜的平均比生长速率. 在盐度 10.07 g/L的水体中川蔓藻的光合放氧速率明显下降,而在盐度超过 5.10 g/L时菹齿眼子菜的光合放氧速率即已开始显著下降,说明川蔓藻的耐盐性较强.

(2)川蔓藻和菹齿眼子菜都能通过迅速累积组织中脯氨酸来对抗盐胁迫,但盐胁迫对菹齿眼子菜的渗透影响较川蔓藻大,菹齿眼子菜对盐胁迫的反应较川蔓藻敏感. 不同盐度下川蔓藻和菹齿眼子菜组织中脯氨酸的含量随时间累积的变化呈指数增长趋势.

(3)盐度为 10.07 g/L时,川蔓藻的丙二醛含量降低与过氧化氢酶升高相关 ($p < 0.05$),而菹齿眼子菜的丙二醛的含量上升,过氧化氢酶的含量则下降 ($p < 0.05$),氧自由基产生和消除之间的平衡被破坏.

(4) 当盐度超过 7.72 g/L时,川蔓藻和菹齿眼子菜中叶绿素和叶绿素 a/b值含量均显著下降,但川蔓藻则能通过增加叶绿素 b来补偿盐度对光合作用效率的影响.

(5) 研究结果表明川蔓藻和菹齿眼子菜均能通过调节自身的脯氨酸代谢和抗氧化系统来抵抗再生水中盐度的胁迫,而且川蔓藻在高盐胁迫下具有较好的清除氧自由基的能力.

参考文献:

[1] 刘建康. 湖泊与水库富营养化防治的理论与实践 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
Liu Jiankang. *Theory and Practice of Controlling Eutrophic Lake and Reservoir* [M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese).

[2] 王国祥,濮培民,张圣照,等. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染 [J],植物资源与环境, 1998, 7 (2): 35-41.
Wang Guoxiang, Pu Peimin, Zhang Shengzhao, et al. The purification of mosaic community of macrophytes for eutrophic lake water[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1998, 7 (2): 35-41 (in Chinese).

[3] 刘萍萍,尹澄清,曲久辉,等. 滨海地区生态型水源地工程的建设 [J]. 中国给水排水, 2004, 20 (9): 17-20.
Liu Pingping, Yin Chengqing, Qu Jiuhui, et al. Construction of ecological water storage basin project in coastal area [J]. *China Water and Wastewater*, 2004, 20 (9): 17-20 (in Chinese).

[4] Adair S E, Moore J L. Distribution and status of submerged vegetation in estuaries of the upper Texas coast [J]. *Wetlands*, 1994, 14 (2): 110-116.

[5] Edgar G J, Robertson A I. The influence of seagrass structure on the distribution and abundance of mobile epifauna: Pattern and process in a Western Australian Amphibolis bed [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1992, 160 (1): 13-31.

[6] Howard R J, Mendelssohn I A. Structure and composition of oligohaline marsh plant communities exposed to salinity pulses [J]. *Aquatic Botany*, 2000, 68 (2): 143-164.

[7] La Peyre Megan K, Rowe Sheryl. Effects of salinity changes on growth of *Ruppia maritima* [J]. *Aquatic Botany*, 2003, 77 (4): 235-241.

[8] 金送笛,李永函,王永利. 几种生态因子对菹草光合作用的影响 [J]. 水生生物学报, 1991, 15 (4): 295-301.
Jin Songdi, Li Yonghan, Wang Yongli. Effects of ecological factors on photosynthesis of *Potamogeton crispus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1991, 15 (4): 295-301 (in Chinese).

[9] 张志良,翟伟箐. 植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
Zhang Zhiliang, Zhai Weiqing. *Phytophysiologica Experiment Guide* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese).

[10] 赵可夫. 植物抗盐生理学 [M]. 北京:科学出版社, 1993.
Zhao Kefu. *The Plant Resist Salt Physiology* [M]. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese).

[11] Ye Chunjiang, Zhao Kefu. Effects of adaptation to elevated salinity on some enzymes' salt-tolerance and physiological changes of eelgrass [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44 (7): 788-794.

[12] Lesley R M, Stephen T K, Michael J D. Physiological effects of short-term salinity changes on *Ruppia maritima* [J]. *Aquatic Botany*, 2003, 75 (4): 293-309.

[13] Pulich W M J. Effects of rhizosphere macronutrients and sulfide levels on the growth physiology of *Halodule wrightii Aschers* and *Ruppia maritima* [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1989, 127 (1): 69-80.

[14] Madsen J D, Adams M S. The light and temperature dependence of photosynthesis and respiration in *Potamogeton pectinutus* [J]. *Aquatic Botany*, 1989, 36 (1): 23-31.