

盐胁迫对芦苇与碱蓬叶绿素荧光特性的影响

张钰荣^{1,2}, 吴永波^{1,2,*}

(1. 南京林业大学生态与环境学院 南京 210037; 2. 江苏南方现代林业协同创新中心 南京 210037)

摘要:【目的】阐明盐胁迫下芦苇(*Phragmites australis*)与碱蓬(*Suaeda glauca*)的荧光特性与光保护机制。【方法】采用盆栽实验, 设置盐浓度分别为 0%(对照)、0.5%(C1)、1%(C2)、1.5%(C3)、2%(C4)、2.5%(C5)和 3.5%(C6), 测定芦苇与碱蓬幼苗的光合色素含量与叶片叶绿素荧光参数, 分析其变化规律。【结果】在盐胁迫下芦苇与碱蓬光合色素含量与叶绿素荧光参数表现出不同的变化规律。芦苇叶片光合色素含量、实际光合效率[Y(II)]和电子传递速率(ETR)均随土壤含盐量增加呈下降趋势。相同光照强度下对照中芦苇的电子传递效率潜在最大值(ETRmax)高于各处理; 而 C1、C2 和 C3 处理下碱蓬的 ETRmax 值相比对照有所增加。碱蓬的最大光化学效率(F_v/F_m)在 C5 和 C6 处理下显著低于对照; 随盐浓度增加, 其 Y(II)和 ETR 值呈先增加后减小的趋势, 且均在 C3 处理中有最大值。芦苇光化学淬灭系数(q_p)随盐浓度增加逐渐下降, 非光化学淬灭系数(NPQ)随土壤含盐量增加呈先升后降的趋势。碱蓬 q_p 和 NPQ 值随土壤含盐量增加均呈先降后升的趋势。在各浓度盐胁迫下, 芦苇的 NPQ 值均达到 0.6 以上, 高于碱蓬。综上所述, 盐胁迫抑制了芦苇体内光合色素的合成, 同时影响了光合电子传递, 降低光能转换效率。对碱蓬来说, 低浓度盐胁迫能促进光合色素的合成, 促进对光能的吸收, 增强电子传递速率; 而高浓度盐胁迫会抑制光合电子传递。芦苇通过热的形式耗散过剩光能以保护光合结构不受破坏的能力更强。

关键词: 芦苇; 碱蓬; 光合色素; 叶绿素荧光参数

Effects of salt stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Phragmites australis* and *Suaeda glauca*

Abstract: 【Objective】 The aim of this study was to clarify the fluorescence characteristics and photoprotection mechanism of *Phragmites australis* and *Suaeda glauca* under salt stress. 【Method】 The pot experiment was conducted with seedlings. The salt concentrations of 0% (control), 0.5% (C1), 1% (C2), 1.5% (C3), 2% (C4), 2.5% (C5) and 3.5% (C6) were set to measure the photosynthetic pigment contents and chlorophyll fluorescence parameters of *P. australis* and *S. glauca* seedlings, with subsequent analysis of their changes. 【Result】 The photosynthetic pigment contents and chlorophyll fluorescence parameters of *P. australis* and *S. glauca* had different changes under salt stress. Specifically, the photosynthetic pigment contents, actual photosynthetic efficiency [Y(II)], and electron transport rate (ETR) of *P. australis* leaves decreased with increasing soil salt content. Under the same light intensity, the potential maximum value of electron transport efficiency (ETRmax) of *P. australis* in control was higher than those in other treatments. The ETRmax of *S. glauca* in the C1, C2, and C3 treatments increased compared to the control. The maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of *S. glauca* under C5 and C6 treatments were significantly lower than that of the control. With the increase of salt concentration, the Y(II) and ETR values increased first and then decreased, and both had maximum values at C3 treatment. The photochemical quenching coefficient (q_p) of *P. australis* gradually decreased with the increase of salt concentration, while the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) tended to increase and then decreased. Both q_p and NPQ values of *S. glauca* showed a decreasing and then increasing trend with the increase of soil salinity. Under different salt concentrations, NPQ of *P. australis* was above 0.6, which was higher than that of *S. glauca*. In conclusion, the imposition of salt stress inhibited the synthesis of photosynthetic pigments, affected photosynthetic electron transport, and lowered light energy conversion efficiency in *P. australis* seedlings. Conversely, low salinity stress in *S. glauca* could promote photosynthetic pigment synthesis, facilitate light energy absorption, and enhance electron transport rate. Nevertheless, high concentration of salt stress can inhibit photosynthetic electron transport. *P. australis* has a stronger ability to dissipate excess light energy as heat to protect photosynthetic structures from damage.

Key words: *Phragmites australis*; *Suaeda glauca*; photosynthetic pigments; chlorophyll fluorescence parameters

江苏拥有广阔的海岸带, 盐土资源丰富。随着气候变化和人类对沿海湿地日益增加的开发利用, 土

壤盐渍化日益严重,植被组成发生变化(杨俊博等 2021),物种多样性降低导致生态系统过程稳定性减弱(Loreau 等 2001; Herbert 等 2015)。因此,选育适宜的耐盐植物有利于改善湿地环境,增加生态效益。

盐胁迫会降低植物光合作用效率(王宝强等 2021),抑制光合色素合成并加快光合色素分解,甚至影响光系统活性,破坏光合机构,导致植物的光能转化效率、光合效率和光合电子传递效率降低(张娅等 2021; 马金龙等 2013)。光合色素含量减少可以直接导致光合速率的降低(师生波等 2017; 阮圆等 2008),但光合色素含量的高低不能完全反映叶片光合能力的强弱。植物可以通过改变自身的荧光特性来适应胁迫(Zhang 等 2019),而叶绿素荧光动力学技术做为研究植物光合作用的快速、无损探针(张守仁 1999),常被用于探究植物在胁迫条件下的光合作用特征(Osipova 等 2019)。植物可以通过增加 PSII 反应中心非光化学淬灭来减轻胁迫所造成的伤害(郭淑华等 2017; 李泽等 2017)。但这种保护能力存在一定限度,当胁迫超过植物自身的调节范围时,植物的光合机构将受损,其通过热能形式耗散过剩光能的能力会受到抑制(Shin 等 2020)。

芦苇(*Phragmites australis*)与碱蓬(*Suaeda glauca*)是江苏沿海滩涂湿地的主要优势种(赵宝泉等 2018)。芦苇可通过渗透调节来增强自身的耐盐性(Vasquez 等 2005); 碱蓬作为真盐生植物具有较强耐盐性,常用于滨海盐渍土改良(张立宾等 2007; Yang 等 2008)。近年来这两种植物种群因外来物种入侵严重萎缩,滨海湿地植被单一化程度加深(王娟等 2020; 王聪和刘红玉 2014; 张佳佳和沈永明 2018),因此恢复湿地植被、增强物种多样性迫在眉睫。研究了在不同盐胁迫下芦苇与碱蓬叶绿素荧光参数的变化特征,从光合能力的角度探究植物的耐盐性,为江苏沿海湿地植被恢复筛选适宜植物提供科学依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料与盐胁迫处理

2022 年 3 月 5 日播种芦苇与碱蓬种子,5 月中旬选择生长状况一致的幼苗移栽至大棚的塑料盆内,每盆种植 5-10 株,种植土为田间土与营养土 1:1 混合。7 月 15 日进行施盐(NaCl)处理,共设 7 个盐度梯度:0%(对照)、0.5%(C1)、1%(C2)、1.5%(C3)、2%(C4)、2.5%(C5)和 3.5%(C6)。8 月 13 日测定不同盐胁迫下植物叶片叶绿素荧光动力学参数和光合色素含量。

1.2 光合色素含量测定

采用分光光度计法测定植物叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)含量。取新鲜植物叶片,去掉主脉后剪碎,浸泡于 95%乙醇中,样品置于恒温培养箱中避光浸提 48 h(叶片组织发白),最后在波长 665 nm、649 nm 和 470 nm 下测定吸光度并计算各光合色素含量。

1.3 叶绿素荧光参数测定

使用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2500 (德国 WALZ 公司)测定叶绿素荧光参数。植物在夜晚自然条件下能进行充分的暗适应,因此测定时间为 22:00-2:00,在野外条件下选择光适应叶夹进行光强校准。利用内置自动光源测定慢速诱导动力学曲线,测定光系统 II(PSII)最大光合效率 $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ 、PSII 实际光合效率[Y(II)]、表观电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qp)和非光化学淬灭系数(NPQ)。在测定诱导曲线后,直接调用其第一个脉冲测得的 F_m 和 F_o 测定光曲线。设置递增的光强梯度,每个光强梯度照光时间为 10s,测量快速光响应曲线,最后进行曲线拟合。由于芦苇与碱蓬达到稳定最大电子传递速率的光强不同,因此设置不同的光强梯度:芦苇的光强梯度从弱到强为 0、14、40、71、104、140、186、248、330、551、846 和 1 193 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 碱蓬为 0、14、40、71、104、140、186、248、330、551、846、1 193、1 736 和 2 563 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 F_m 、 F_o 分别为暗适应后最大荧光值和最小荧光值。

2 实验结果

2.1 不同浓度盐胁迫下植物光合色素含量的变化

由表 1 可知，随着土壤盐含量的增加，芦苇叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量呈下降趋势。土壤含盐量达到并高于 1%时，光合色素含量显著减少。土壤含盐量为 2.5%和 3.5%时，芦苇叶片三种光合色素含量差异均不显著，但其与对照组差异显著；与对照相比，土壤盐含量为 1%、1.5%和 2%时，Chl a 含量分别下降了 62.4%、72.7%和 66.6%，Chl b 含量分别下降了 66.5%、61.0%和 72.5%，Car 含量分别下降了 59.4%、70.0%和 68.0%。三个处理间差异不显著，但其与对照差异均显著。

表 1 不同盐胁迫下芦苇与碱蓬的光合色素含量

Table1 Photosynthetic pigment content of <i>Phragmites australis</i> and <i>Suaeda glauca</i> under different salt stress						
处理	芦苇			碱蓬		
	叶绿素 a 含量 /mg·g ⁻¹	叶绿素 b 含量 /mg·g ⁻¹	类胡萝卜素含量 /mg·g ⁻¹	叶绿素 a 含量 /mg·g ⁻¹	叶绿素 b 含量 /mg·g ⁻¹	类胡萝卜素含量 /mg·g ⁻¹
对照	3.442±0.457 ^a	1.477±0.113 ^a	0.466±0.082 ^a	1.533±0.183 ^{ab}	0.881±0.102 ^a	0.085±0.022 ^b
C1	2.760±0.097 ^a	1.144±0.048 ^b	0.401±0.053 ^a	0.801±0.153 ^c	0.403±0.063 ^b	0.081±0.020 ^b
C2	1.295±0.120 ^b	0.495±0.038 ^{cd}	0.189±0.030 ^b	1.596±0.204 ^{ab}	0.761±0.133 ^a	0.136±0.010 ^a
C3	0.938±0.243 ^b	0.575±0.134 ^c	0.140±0.063 ^{bc}	1.915±0.146 ^a	0.918±0.073 ^a	0.129±0.015 ^{ab}
C4	1.151±0.409 ^b	0.407±0.151 ^{cd}	0.149±0.088 ^{bc}	1.396±0.035 ^b	0.790±0.018 ^a	0.050±0.012 ^b
C5	0.547±0.199 ^{bc}	0.261±0.105 ^d	0.060±0.017 ^{bc}	0.511±0.078 ^c	0.263±0.039 ^b	0.048±0.013 ^b
C6	0.002±0.003 ^c	0.000±0.003 ^d	0.016±0.002 ^c	0.910±0.048 ^c	0.391±0.021 ^b	0.112±0.011 ^{ab}

注：不同的小写字母表示同一指标不同处理之间差异显著 (P<0.05)，表 2 同。

碱蓬植物光合色素含量随盐度梯度的升高呈现出先升高后降低的趋势(表 1)。与对照相比，土壤盐含量为 1.5%时，Chl a 与 Chl b 含量最高：分别增加了 19.9%和 4.0%，但差异不显著。处理组 C1、C5 和 C6 间 Chl a 与 Chl b 含量差异不显著，但与其他处理差异均显著。土壤盐含量为 1%时，碱蓬 Car 含量最高，显著高于对照。

由图 1 可知，芦苇叶片叶绿素总量随土壤含盐量的增加呈下降的趋势。碱蓬叶绿素总量变化趋势与芦苇不同，呈先升后降的趋势。总体来看，土壤含盐量较低时芦苇叶绿素总量高于碱蓬；随着土壤含盐量升高，碱蓬叶绿素总量逐渐高于芦苇。将不同处理下芦苇与碱蓬的叶绿素总量进行对比发现：在对照和 C1 处理下，芦苇叶绿素含量显著高于碱蓬。在 C2、C3 和 C4 处理下碱蓬叶绿素含量高于芦苇，但差异不显著。在 C6 处理下，碱蓬叶绿素含量显著高于芦苇。这说明，在土壤含盐量较高的情况下碱蓬具有比芦苇更强的合成与保护叶绿素的能力。

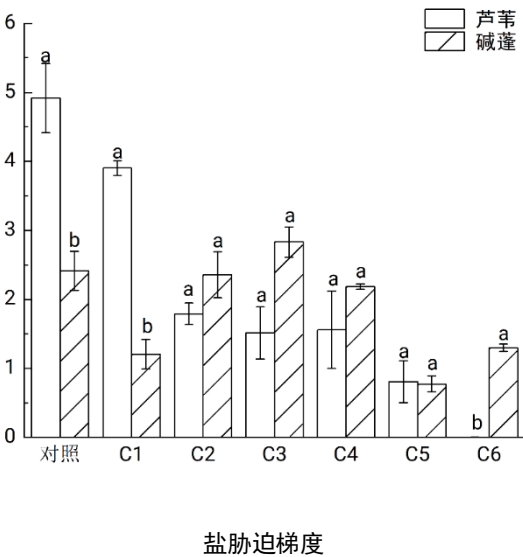


图 1 不同盐胁迫下芦苇与碱蓬的叶绿素总量

Fig.1The total chlorophyll content between *Phragmites australis* and *Suaeda glauca* under different salt stress

注：不同小写字母表示同一处理下两种植物间差异显著 (P<0.05)。

2.2 不同浓度盐胁迫下植物光响应曲线的变化

表观光合电子传递速率(photosynthetic electron transport rate,ETR)反映实际光强下的表观电子传递效率。ETR_{max} 为电子传递效率潜在最大值, α 为曲线初始斜率反映植物对光能的利用效率。由芦苇光响应曲线(图 2)可知, 在各土壤盐胁迫下, 随光合有效辐射增强, 植物表观电子传递速率增快并在达到最大速率后逐渐趋于稳定。相同光强下对照组芦苇叶片 ETR 均高于处理组, ETR_{max} 随着土壤盐胁迫程度加剧总体呈下降趋势(表 2)。不同处理下植物达到潜在最大电子传递速率的光强不同: 光强为 $1\ 193\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对照、C1 和 C2 组的植物达到最大电子传递速率; C3、C4 和 C5 组植物在光强为 $846\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最大电子传递速率, 此后随光强增加 ETR 有所下降。说明盐胁迫导致芦苇适应强光的能力下降, 光合电子传递过程受损伤或受抑制。由表 2 可知, CK 的植物电子传递速率与光能利用效率最高。对照与 C3 处理的 ETR_{max} 差异不显著, 与其他处理差异显著。

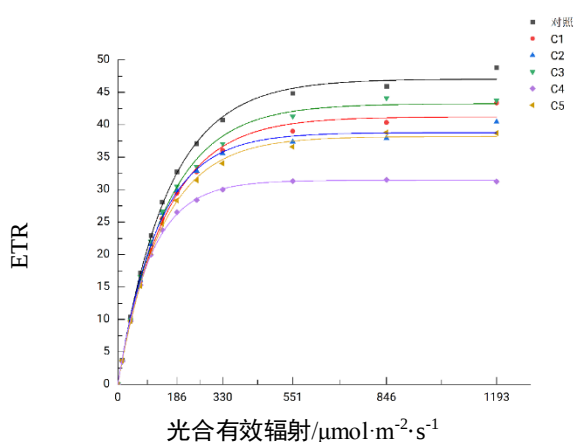


图 2 不同盐胁迫下芦苇的快速光响应曲线

Fig.2 Rapid Light Curve of *Phragmites australis* under different salt stress

注: 在 C6 梯度下芦苇叶片大量干枯脱落因此未测得有效荧光参数, 下同。

由图 3 和表 2 可知, 在土壤含盐量为 0.5%、1%和 1.5%时, 同光照强度下其植物表观电子传递效率均高于对照, ETR_{max} 值相比对照分别升高了 8.3%、4.3%和 4.0%; 当土壤含盐量为 1.5%时, α 值最大。说明低盐浓度能加快光合电子传递, 提高光能利用效率, 促进碱蓬光合作用的进行。当土壤含盐量增加至 2.5%和 3.5%时, 其 ETR_{max} 值相比最高组(C1)分别降低了 27.3%和 43.7%, 差异显著。在各胁迫梯度下, 碱蓬幼苗的最大潜在电子传递速率均高于芦苇。

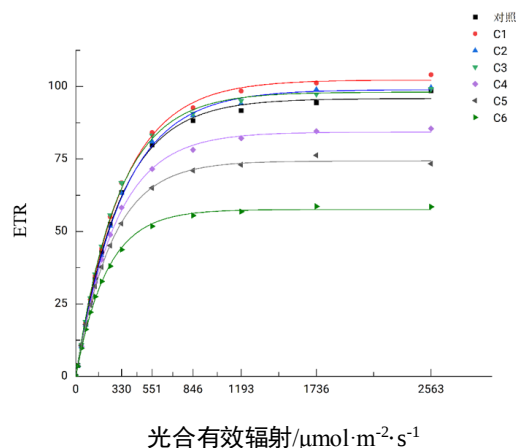


图 3 不同盐胁迫下碱蓬的快速光响应曲线

Fig.3 Rapid Light Curve of *Suaeda glauca* under different salt stress

表 2 不同盐胁迫下 ETRmax 和 α 值的变化Table2 Changes of ETRmax and α values under different salt stress

处理	ETRmax		α	
	芦苇	碱蓬	芦苇	碱蓬
对照	50.88±1.92 ^a	95.96±1.90 ^{ab}	0.36±0.01 ^a	0.33±0.01 ^a
C1	42.56±0.43 ^b	103.88±1.95 ^a	0.33±0.01 ^b	0.34±0.01 ^a
C2	40.58±0.68 ^b	100.08±3.39 ^a	0.35±0.01 ^{ab}	0.32±0.01 ^a
C3	46.53±1.49 ^{ab}	99.78±2.64 ^a	0.34±0.01 ^{ab}	0.35±0 ^a
C4	32.58±1.58 ^c	85.92±6.54 ^{ab}	0.34±0.01 ^{ab}	0.33±0 ^a
C5	39.25±3.45 ^b	77.07±11.69 ^b	0.32±0.02 ^b	0.33±0.01 ^a
C6	—	60.08±10.17 ^b	—	0.31±0.03 ^a

2.3 PSII 系统光化学效率和电子传递速率的变化

由图 4-A 可知, 芦苇叶片 PSII 最大光化学效率(Fv/Fm)在 C2 处理下有最大值, 但与对照、C1 和 C4 间无显著性差异。与对照相比, C3 和 C5 下降幅度分别为 1.4%和 2.4%。图 4-C 和 E 中, 芦苇叶片 PSII 实际光合效率[Y(II)]和电子传递速率(ETR)均表现为: 对照>C3>C2>C1>C5>C4, 随胁迫程度加剧呈缓慢下降的趋势。与对照相比, C3 处理下的 Y(II)和 ETR 分别下降 4.4%和 4.3%, 差异不显著, 其他处理差异显著。说明在土壤含盐量为 1.5%时, 芦苇叶片光合效率受盐胁迫影响较小, 土壤含盐量高于 1.5%时, 随盐浓度增加芦苇光合作用明显受到抑制。

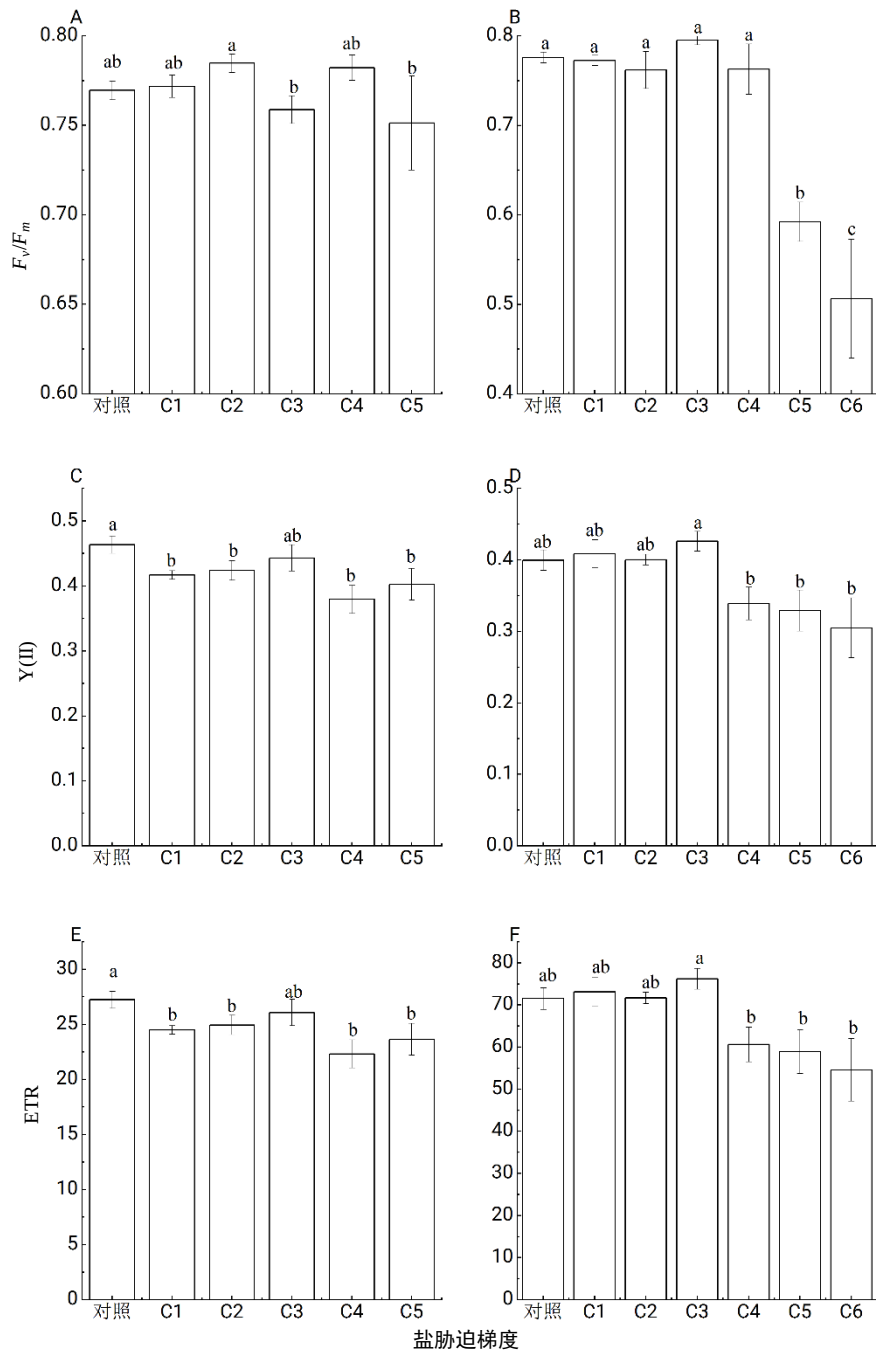


图 4 盐胁迫对芦苇和碱蓬的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 ETR 的影响

Fig.4 Effects of salt stress on F_v/F_m , $Y(II)$ and ETR of *Phragmites australis* and *Suaeda glauca*

注：A、C 和 E 分别为芦苇的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 ETR；B、D 和 F 分别为碱蓬的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 ETR。不同的小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

由图 4-B、D、F 可看出，随盐度梯度增加，碱蓬光合效率与电子传递速率呈先增加后减小的趋势，且均在 C3 处理有最大值，说明适宜的盐胁迫有助于碱蓬光合作用的进行。碱蓬叶片最大光化学效率 (F_v/F_m) 在 C3 处理与对照间无明显差异；C5、C6 处理的 F_v/F_m 值比对照分别降低了 23.7% 和 34.7%，差异显著。碱蓬 $Y(II)$ 和 ETR 具有相同的变化趋势：均在 C3 处理最大，且与盐浓度更低的处理 and 对照间无显著性差异；土壤含盐量达到 2% 后，随盐浓度增加 $Y(II)$ 和 ETR 逐渐下降。与 C3 处理相比，C4、C5 和 C6 处理的 $Y(II)$ 和 ETR 值分别下降了 20.5%、22.8%、28.4% 和 20.4%、22.7%、28.3%，差异显著。

总体来看，在不同处理下，植物的 PSII 实际光合效率与表观电子传递效率变化趋势基本一致。随着

盐浓度增加, 芦苇 Y(II)和 ETR 值总体均呈下降趋势, 而碱蓬的 Y(II)和 ETR 值先上升后下降。

2.4 PS II 系统光化学淬灭与非光化学淬灭的变化

如图所示, 随盐浓度增加, 芦苇的光化学淬灭系数(q_P)总体呈下降趋势。C3 处理较对照增加了 0.7%, 差异不显著。C2、C4 和 C5 处理较对照分别下降了 10.9%、18.6%和 19.2%, 差异显著。表明 C3 处理对芦苇 PSII 的电子传递活性影响不明显, 而 C2、C4 和 C5 处理明显减弱了 PSII 的电子传递活性。芦苇的非光化学淬灭系数(NPQ)随盐浓度增加总体呈先升后降的趋势。C1、C2、C3 和 C4 四个处理间差异不显著, 其 NPQ 相比对照有不同程度的增加, 分别为: 28.3%、21.6%、34.9%和 24.7%, 且差异均显著。表明在盐胁迫下, 芦苇叶片 PSII 的过剩光能通过非光化学途径以热的形式发生不同程度的耗散以保护植物的光合机构。C5 处理下 NPQ 比对照下降了 3.8%, 说明在高浓度盐胁迫下, 芦苇光系统可能受到破坏, 其过剩光能的耗散能力下降。

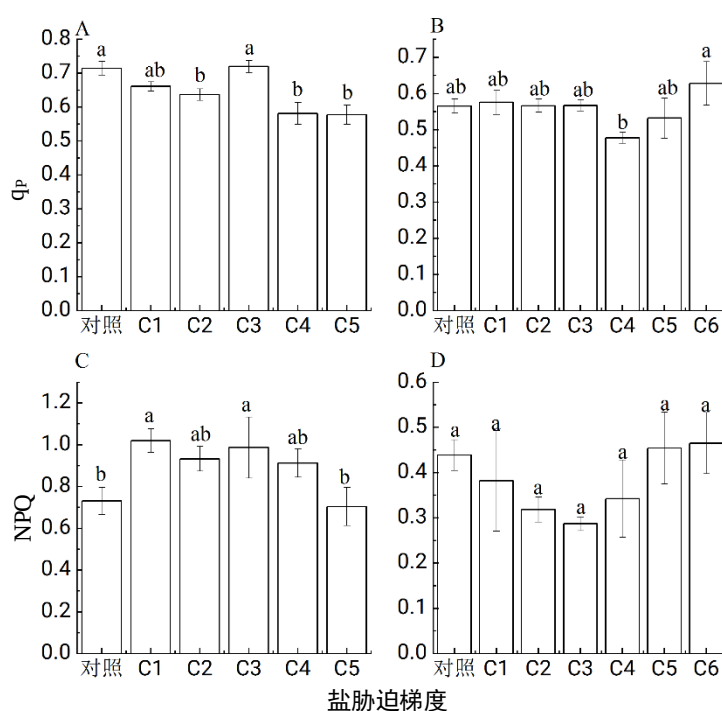


图5 盐胁迫对芦苇和碱蓬的 q_P 和 NPQ 的影响

Fig.5 Effects of salt stress on q_P and NPQ of *Phragmites australis* and *Suaeda glauca*

注: A、C 为芦苇的 q_P 和 NPQ; B、D 为碱蓬的 q_P 和 NPQ。

碱蓬的 q_P 随土壤含盐量增加呈先降后升的趋势。对照与 C1、C2 和 C3 处理间的差异不显著。C4 和 C5 处理下 q_P 较对照分别下降了 15.5%和 5.9%, 说明在 C4 和 C5 处理下碱蓬 PSII 反应中心的开放程度降低。其中, C4 处理下碱蓬 PSII 的电子传递活性显著下降。C6 处理下 q_P 较对照有所增加, 但差异不显著。说明高盐胁迫可能促使植物增强了自我调节能力, 将更多吸收的光能用于光合作用以保证自身生长。随盐浓度增加, 碱蓬的 NPQ 呈先降后升的趋势。不同处理间 NPQ 值差异不显著, 表明在盐胁迫下碱蓬通过增加热耗散以保护 PSII 反应中心免受破坏的作用不明显。与对照相比, C1、C2、C3 和 C4 分别下降了 12.8%、27.4%、34.6%和 21.9%。说明过剩光能以热的形式耗散的比例下降。结合 q_P 的变化情况, 在 C1、C2 和 C3 处理下, 盐胁迫对碱蓬 PSII 反应中心的影响不明显; 碱蓬能够适应低盐胁迫并将光能更多地用于光化学电子传递, 减少光能散失。在 C4 处理下, PSII 反应中心的开放程度较对照下降可能影响过剩光能的热耗散。而当土壤含盐量达到 2.5%和 3.5%时, q_P 和 NPQ 值升高, 说明高盐胁迫可能促

使植物增强了自我调节能力,吸收更多的光能用于光合作用并加强过剩光能热耗散以保护光系统保证自身生长。

3 讨论

光合色素是植物进行光合作用的基础,参与光合作用中光能的吸收与传递,其含量变化反映了植物的生长状况。叶绿素含量是衡量植物抗逆性的重要指标之一(Galicia-Campos 等 2022)。类胡萝卜素能将吸收的光能传递给叶绿素分子,并在光保护中起到重要作用。本研究中,芦苇叶片光合色素含量随土壤含盐量增加呈下降趋势,而碱蓬叶片总体呈先升后降的趋势。低浓度盐胁迫对芦苇幼苗的光合色素含量不会产生显著影响,但随着盐浓度增加芦苇叶片光合色素含量显著下降,说明光合色素合成受到抑制,影响植物的光合作用与正常生长。对碱蓬幼苗来说,一定浓度的盐胁迫可能激活了其保护机制,抑制了色素水解酶的活性,促进了光合色素的合成,而较高浓度盐胁迫会抑制光合色素合成,使其含量显著降低,这与刘莉娜等(2019)的研究结果相一致。

不同浓度盐胁迫下芦苇与碱蓬的光响应曲线,能反映植物的光合作用能力对光强变化的响应情况。 F_v/F_m 反映 PSII 反应中心最大光能转换效率; $Y(II)$ 可以反映 PSII 反应中心部分关闭下的实际原初光能捕获效率,作为衡量植物实际光合效率的指标; ETR 表征实际光强条件下的表观电子传递效率。逆境胁迫会使 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 ETR 值降低(南思睿等 2022; 钱玥和饶良懿 2022)。

本研究中,同光强下对照中芦苇的 ETR 均高于各盐处理, ETR_{max} 和 α 均为最大值。随盐浓度增加,芦苇的 $Y(II)$ 、 ETR 和 qP 值总体呈下降趋势。 qP 在一定程度上能反映 PSII 反应中心的开放程度和光合活性的高低。说明盐胁迫降低了芦苇在实际光强下的表观电子传递效率,使 PSII 反应中心开放程度降低,导致对光能的捕获效率降低,从而影响光合作用效率。植物可以通过将过剩的光能以热的形式耗散掉以进行自我保护, NPQ 是 PSII 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热能的形式耗散掉的部分,是 PSII 的一种自我保护机制(Shin 等 2020)。芦苇的 NPQ 值随盐浓度增加呈先升后降的趋势,表明芦苇通过耗散过剩光能以保护光合机构的能力是有限的,当土壤含盐量过高时,光系统可能受到破坏,对过剩光能的耗散能力减弱。

在盐胁迫下,碱蓬具有与芦苇不同的光合特性。 C_1 、 C_2 和 C_3 处理中 ETR_{max} 均高于对照; $Y(II)$ 和 ETR 值也有所增加,但差异不显著。在 C_3 处理中, F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 ETR 值均达到最大。相比最大值, C_4 、 C_5 和 C_6 处理中 $Y(II)$ 和 ETR 值显著下降; C_5 和 C_6 处理中 F_v/F_m 值均低于 0.6,光能转换效率显著降低,发生光抑制现象(钱永强 2011)。说明低浓度盐胁迫能促使碱蓬加快对光能的吸收与利用,提高了 PSII 反应中心活性,加快电子传递;而高浓度盐胁迫会降低光合电子传递效率,甚至产生光抑制。碱蓬的 NPQ 变化不显著,说明在盐胁迫下碱蓬通过增加热耗散以保护 PSII 反应中心的作用不明显。

4 结论

综上所述,在盐胁迫下,芦苇和碱蓬的光合色素含量与叶绿素荧光值表现出不同的变化特征。盐胁迫导致芦苇的光合色素含量显著下降,PSII 反应中心的开放程度降低,从而降低光能转化效率和光合电子传递效率。低浓度盐胁迫下芦苇可以通过增加过剩光能热耗散以保护光合机构,当盐浓度过高时其热耗散能力下降。对碱蓬而言,低浓度盐胁迫对光合色素含量与光合电子传递的影响不显著,在一定程度上能促进电子传递速率并增强 PSII 活性,说明碱蓬能适应低盐胁迫。而高浓度的盐胁迫会引发光合电子传递受阻,导致 PSII 反应中心失活或关闭,产生光抑制(Malnoë2018)。

参考文献

- Galicia-Campos E, Garcí a-Villaraco Velasco A, Montero-Palmero MB, et al.2022. Modulation of Photosynthesis and ROS Scavenging Response by Beneficial Bacteria in *Olea europaea* Plantlets under Salt Stress Conditions. *Plants*, 11 (20):2748
- 郭淑华,牛彦杰,翟衡等.2017.碱性盐胁迫对葡萄杂交砧木荧光特性、叶黄素循环与抗氰呼吸的影响.植物生理学报,53 (11):2013–2021
- (Guo SH, Niu YJ, Zhai H, et al.2017. Effect of alkaline salt stress on fluorescence characteristics, xanthophyll cycle and cyanide-resistant respiration of grape hybrid rootstocks. *Plant PhysiolJ*, 53 (11):2013–2021. [in Chinese])
- Herbert ER, Boon P, Burgin AJ, et al.2015. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 6 (10):1–43
- 李泽,谭晓风,卢锬等.2017.干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响.生态学报,37 (5):1515–1524
- (Li Z, Tan XF, Lu K, et al.2017. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings. *Acta Ecol Sin*, 37 (5):1515–1524. [in Chinese])
- 刘莉娜,张卫强,黄芳芳等.2019.盐胁迫对银叶树幼苗光合特性与叶绿素荧光参数的影响.森林与环境学报,39 (6):601–607
- (Liu LN, Zhang WQ, Huang FF, et al.2019. Effects of NaCl stress on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Heritiera littoralis* seedling. *J Forest Env*, 39(6):601–607. [in Chinese])
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al.2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294 (5543): 804–808
- 马金龙,姜国斌,姚善泾等.2013.微透析法研究盐胁迫下杨树嫩茎内源激素和叶片叶绿素荧光参数的变化.植物生理学报,49 (9),943–948
- (Ma JL, Jiang GB, Yao SJ, et al.2013. Changes of Endogenous Hormones in the Tender Stems and Chlorophyll Fluorescence in the Leaves of Poplar Trees under Salt Stress by Microdialysis. *Plant Physiol J*, 49 (9):943–948. [in Chinese])
- Malnoë A.2018. Photoinhibition or photoprotection of photosynthesis? Update on the (newly termed) sustained quenching component qH. *EnvExp Bot*, 154:123–133
- 南思睿,罗永忠,于思敏等.2022.干旱胁迫后复水对新疆大叶苜蓿幼苗光合和叶绿素荧光的影响.草地学报, 30 (5):1141–1149
- (Nan SR, Luo YZ, Yu SM, et al.2022. Effects of Rewatering after Drought Stress on Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence of *Medicago sativa* cv. xingjiangdaye Seedlings. *Acta Agres Sin*, 30 (5):1141–1149. [in Chinese])
- Osipova SV, Permyakov AV, Permyakova MD, et al.2019. Tolerance of the photosynthetic apparatus in recombinant lines of wheat adapting to water stress of varying intensity. *Photosynthetica*, 57 (1): 160–169.
- 钱玥,饶良懿.2022.盐碱胁迫对枸杞幼苗生长与叶绿素荧光特性的影响.森林与环境学报, 42 (3):271–278
- (Qian Y, Rao LY.2022. Effects of saline-alkali stress on the growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Lycium barbarum* seedlings. *J Forand Env*, 42 (3):271–278. [in Chinese])
- 钱永强,周晓星,韩蕾等.2011.Cd²⁺胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响.生态学报,31 (20):6134–6142.
- (Qian YQ, ZHOU XX, Han L, et al.2011. Rapid light-response curves of PSIIchlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Salix leucopithecia* subjected to cadmium-ion stress. *Acta Ecol Sin*, 31 (20): 6134–6142. [in Chinese])
- 阮圆,刘戎,王宝山.2008.不同自然盐渍生境下盐地碱蓬叶片色素积累及光合特性的研究.山东师范大学学报(自然科学版),23 (1):115–117
- (Ruan Y, Liu Y, Wang BS.2008. Study on the pigment accumulation and characteristics of photosynthesis of *Suaeda salsa* under different natural saline environments. *J Shand Norm Univ (Natural Science)*, 23 (1): 115–117. [in Chinese])
- Shi SB, Liu KB, Zhang YH, et al.2017. Convergent adaptation of PSII photochemical characteristics of four spruce species growing in Minqin Desert Botanical Garden. *Acta Ecol Sin*, 37 (15): 5039–5048 (in Chinese with English abstract) [师生波,刘克彪,张莹花等 (2017).民勤沙生植物园 4 种云杉属植物光化学特性的趋同适应.生态学报,37 (15):5039–5048]
- Shin YK, Bhandari SR, Cho MC, et al.2020. Evaluation of chlorophyll fluorescence parameters and proline content in tomato seedlings grown under diferent salt stress conditions. *Hort, Env, Biotechnol*, 61:433–443
- Shin YK, Bhandari SR, Jo JS, et al.2020. Response to Salt Stress in Lettuce: Changes in Chlorophyll Fluorescence Parameters,

Phytochemical Contents, and Antioxidant Activities. *Agron*, 10 (11):1627

Vasquez EA, Glenn EP, Brown JJ, et al.2005. Salt tolerance underlies the cryptic invasion of North American salt marshes by an introduced haplotype of the common reed *Phragmites australis* (Poaceae). *Marin EcolProg Series*, 298:1–8

王宝强,赵颖,朱晓林等.2021.盐碱胁迫对藜麦幼苗叶片光合特性及抗氧化系统的影响.草地学报,29 (8):1689–1696

(Wang BQ, Zhao Y, Zhu XL, et al.2021.Effects of Saline-alkali Stress on Photosynthesis Characteristics and Antioxidant System in Quinoa Seedlings Leaf. *Acta Agres Sin*, 29 (8),1689-1696. [in Chinese])

王聪,刘红玉.2014.江苏淤泥质潮滩湿地互花米草扩张对湿地景观的影响.资源科学,36 (11):2413–2422

(Wang C, Liu HY.2014. The Impact of *Spartina Alterniflora* Expansion on Vegetation Landscapes in the Yancheng Tidal Flat Wetland. *Res Science*, 36 (11): 2413–2422. [in Chinese])

王娟,张华兵,刘玉卿等.2020.盐城滨海湿地植物群落种间格局与竞争的关系研究.生态学报, 40 (24):8966–8973

(Wang J, Zhang HB, Liu YQ, et al.2020. Interspecific pattern and competitive relationship of plant community in Yancheng coastal wetland. *Acta Ecol Sin*, 40 (24):8966–8973. [in Chinese])

Yang C, Shi D, Wang D.2008. Comparative effects of salt and alkali stresses on growth, osmotic adjustment and ionic balance of an alkali-resistant halophyte *Suaeda glauca* (Bge.). *Plant Grow Reg*, 56 (2): 179–190

杨俊博,田锴,吴传万等.2021.江苏植被的分布现状、驱动力及保护建议.中国科学:生命科学,51 (3):242–253

(Yang JB, Tian K, Wu CW, et al.2021.Distribution status, driving force, and protection suggestions of vegetation in Jiangsu Province, China. *ScienSin(Vitae)*, 51 (3): 242–253. [in Chinese])

Zhang F, Zhu K, Wang YQ, et al(2019). Changes in photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of sorghum under drought and waterlogging stress. *Photosynthetica*, 57 (4): 1156–1164

张佳佳,沈永明.2018.1992 年以来盐城滨海湿地植被动态变化研究.海洋科学,42 (8):14–21

(Zhang JJ, Shen YM.2018. Dynamic changes of coastal wetland vegetation in Yancheng. *Marin Sciences*, 42 (8):14–21. [in Chinese])

张立宾,徐化凌,赵庚星.2007.碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果.土壤,39 (2):310–313

(Zhang LB, Xu HL, Zhao GX, et al.2007. Salt Tolerance of *Suaeda Salsa* and Its Soil Ameliorating Effect on Coastal Saline Soil. *Soils*, 39 (2): 310–313. [in Chinese])

张守仁.1999.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论.植物学通报,16 (4):444–448

(Zhang SR.1999. A Discussion on Chlorophyll Fluorescence Kinetics Parameters and Their Significance. *Chin Bull Bot*, 16 (4):444–448.[in Chinese])

张娅,施树倩,李亚萍等.2021.不同盐胁迫下小麦叶片渗透性调节和叶绿素荧光特性.应用生态学报,32 (12):4381–4390

(Zhang Y, Shi SQ, Li YP, et al.2021. Osmotic regulation and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of wheat seedlings under different salt stresses. *Chin J Appl Ecol*, 32 (12): 4381–4390.[in Chinese])

赵宝泉,温祝桂,邢锦城等.2018.江苏沿海滩涂湿地盐生植物区系及物种多样性.中国植物学会八十五周年学术年会论文摘要汇编(1993-2018).2018:172–173.

(Zhao BQ, Wen ZG, Xing JC, et al.2018. Flora and species diversity of halophytes in coastal wetlands of Jiangsu Province. *Coll Abst 85th Annu Con Bot SocChin* (1993-2018), 2018:172–173.[in Chinese])