

复合盐碱胁迫对蓖麻早期幼苗光合生理的影响

王浩楚, 胡启涵, 滕书宇, 王昱锰, 李世豪, 李月明, 蔺吉祥*

(东北林业大学园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】探究复合盐碱胁迫对蓖麻早期幼苗生长阶段子叶与真叶光合能力的影响。【方法】以能源草蓖麻(*Ricinus communis*)为供试材料, 将2种中性盐 NaCl、Na₂SO₄与2种碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃以不同的摩尔比例混合, 模拟土壤复杂的盐碱逆境条件。按照碱性盐比例递增的顺序设置A~F 6组试验组, 同时每个组设置3种盐浓度(25、50、100 mmol/L)。在本试验模拟出的18种盐度和碱度下, 对蓖麻早期幼苗光合生理指标和叶绿素荧光参数进行测定。【结果】随着盐碱胁迫的加深, 除子叶胞间CO₂浓度外, 蓖麻真叶与子叶的光合生理参数和叶绿素荧光参数整体均呈现出下降趋势。尤其是光合速率, 在盐浓度大于25 mmol/L时, 下降显著($P < 0.05$)。真叶气孔导度, 子叶的蒸腾速率、光合速率、实际光化学速率和光化学淬灭系数大幅下降。这类变化在高浓度盐碱胁迫下表现更为显著, 如在最高浓度胁迫下(F₄), 子叶的光化学淬灭系数较上一浓度梯度(F₃)下降47%, 而真叶为22%。【结论】复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗子叶和真叶的光合作用都存在严重影响, 而从子叶受胁迫程度比真叶程度大这一现象推测子叶在蓖麻幼苗响应盐碱胁迫中发挥更加重要的作用, 使真叶受到的胁迫降低从而更好地维持植物的生长发育。

关键词: 蓖麻; 子叶; 真叶; 复合盐碱胁迫; 光合生理

中图分类号: S565.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)02-0123-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2025.02.014



我国的盐碱地面积辽阔, 达3 630万hm², 占可利用土地面积的5%左右^[1]。由于不合理灌溉以及化肥的无节制使用, 土地盐碱化的现象愈发普遍。近年来, 植物修复逐渐成为盐碱地改良最科学有效的措施。在东北松嫩平原上, 由中性盐 NaCl、Na₂SO₄造成的盐胁迫与碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃造成的碱胁迫是导致草地盐碱化的主要原因, 且多为几种盐分混合, 形成复杂的盐碱生境。目前国内外多数研究通常仅关注盐胁迫的生理效应, 而很少关注碱胁迫, 特别是复合盐碱胁迫对植物的毒害效应。

目前对耐盐碱植物抗逆生理所进行的研究不仅对筛选抗盐碱土壤的优良作物、品种等有重要意义, 对改良盐碱化土壤也具有生态效益^[3]。但现有的研究大部分聚焦于拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)、燕麦(*Avena sativa*)及紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等植物材料适应盐胁迫的生理机制变化^[4-6]: 在盐胁迫下, 植物体内积累大量活性氧物质, 影响植物正常生长。对此, 拟南芥和燕麦体内的抗氧化系统产生过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶, 其活性随着盐浓度的升高而增强, 在达到耐盐阈值后降低。同时, 为了维持体内渗透压, 紫花苜蓿通过合成可溶性糖、丙二醛(MDA)等渗透调节物质来抵御胁迫。这些植物体内抗氧化酶、渗透调节物质等抗逆性指标的变化, 都表现出对盐胁迫的一定适应程度。也有研究涉及植物对碱胁迫的生理响应机制: 与盐胁迫相似, 菊芋(*Helianthus tuberosus*)、乌拉尔甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)体内抗氧化酶SOD和渗透调

收稿日期: 2024-03-18; 修回日期: 2024-05-28

基金资助: 大学生创新训练计划省级项目(S20231022 5291)

作者简介: 王浩楚(2003-), 女, 浙江丽水人, 本科生。

E-mail: 1726213459@qq.com

*通信作者, 研究方向为植物逆境生理生态学。

E-mail: linjixiang@nefu.edu.cn

节物质MDA等含量增加^[7-8];此外,碱胁迫还会导致 Na^+ 过度积累,破坏植物体内离子平衡和pH值稳定,亚麻(*Linum usitatissimum*)通过积累大量有机酸来抵御胁迫^[9]。但对于复合盐碱胁迫的研究报道却并不多见,特别是对蓖麻(*Ricinus communis*)这种优良盐碱土改良的能源作物,现有研究主要集中在碱胁迫对其的影响上^[10-11],蓖麻在幼苗阶段对复杂的混合盐碱逆境的生态响应方面仍鲜有报道。

蓖麻,大戟科蓖麻属植物,作为世界十大油料作物之一,素有“绿色石油”之称,还兼有耐贫瘠、耐旱、耐盐碱等优良特性,生态和经济价值均高。近年来,蓖麻在生物改良盐碱领域备受关注,已被用于恢复中国东北松嫩平原退化的盐碱草地。基于此,本研究以蓖麻为对象,系统解析复合盐碱胁迫对蓖麻早期幼苗生长阶段子叶与真叶光合能力的影响,这对于深入理解蓖麻子叶功能、认识蓖麻的耐盐机理、更好地发挥蓖麻在盐碱地植被恢复中的生态学作用具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 盐碱梯度设计

根据东北松嫩平原土壤的盐分组成特征,将中性盐 NaCl 、 Na_2SO_4 与碱性盐 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 以不同的摩尔比例混合,共设置A、B、C、D、E和F 6组(碱性盐比例递增)。同时根据预试验中蓖麻对盐碱的耐受程度,每组设置3种盐浓度(25、50、100 mmol/L),共模拟出18种与东北松嫩草地盐碱环境基本一致的复合盐碱胁迫条件(表1)。

表1 各处理所含盐分及摩尔比

Table 1 Salt composition and molar ratio of treatments

处理组	盐分组成与摩尔比			
	NaCl	Na_2SO_4	NaHCO_3	Na_2CO_3
A	2	1	0	0
B	1	1	1	0
C	12	9	8	1
D	8	9	12	1
E	12	1	8	9
F	0	0	2	1

1.2 供试材料

试验所用蓖麻种子为汾蓖10号,生育期96 d,种子百粒重35 g,由山西省农科院经济作物研究所提供。

挑选粒大饱满的种子经 HgCl_2 消毒并用蒸馏水冲洗3次后待其风干,播种于承装2 kg经高温、高压灭菌(121 °C、240 kPa、2 h)的农田土花盆中(直径12 cm)。随后放进温室(平均温度25 °C、湿度50%~70%)培养,每天适当浇水,保持土壤湿度。当蓖麻幼苗生长至两片真叶完全展开且子叶仍存在于植株上的时候进行胁迫(7 d)处理。使用18种不同浓度处理液进行胁迫处理,施用不含中性盐及碱性盐的蒸馏水处理作为对照,胁迫7 d后进行采样。样品用液氮冷冻后,置于-80 °C冰箱保存,每个处理3次重复。

1.3 气体交换参数测定

在收苗当日9:00—11:00,利用L6400XT便携式光合仪(Li-Cor, USA),搭配Li-6400-02B型红/蓝LED叶室[光强:1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,红光(665 nm):蓝光(447 nm)为9:1]对蓖麻子叶及第1对真叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率进行测定。每片叶测定30次,每盆分别测定5片子叶与真叶取平均值。测定时大气二氧化碳浓度为420 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,温度为25 °C,湿度为50%。

1.4 叶绿素荧光参数测定

将蓖麻幼苗暗处理2 h后,采用脉冲调制叶绿素荧光成像系统(FluorCam FC 800, Photon System Instruments, Czechia)进行测定。每组处理随机选取大小相似的4片子叶,置于FluorCam CCD相机下,采用Quenching-Act 2 预制程序进行测定,其中饱和光(Saturating flashes)强度为45% [1 897.96 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$],光化光2(Actinic light 2)强度为48.95% [1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]。获取叶绿素荧光图像FluorCam 7 (Photon System Instruments, Czechia)处理后,按照Roháček的方法进行计算,获得实际光化学效率(Photochemical efficiency of PS II in the light, $\phi\text{PS II}$)、非光化学淬灭系数(Non photochemical quenching coefficient, NPQ)和光化学淬灭系数(Photochemical quenching coefficient, qP)。

1.5 数据分析

试验数据使用Excel 2022进行整理分析,使用Excel 2022、Origin Pro 2017作图,使用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析,并利用新复极差法对数据进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 复合盐碱胁迫对蓖麻真叶与子叶光合速率的影响

在不同处理组和同一处理组下,除 A₁、A₂和 B₁、B₂组外,蓖麻幼苗真叶(图 1-A)与子叶(图 1-B)光合速率都显著呈下降趋势($P < 0.05$),并且受碱胁迫影响更大。随着盐碱浓度的增加,子叶下降趋势更加显著。例如在同一碱浓度下,A₃组子叶的光合速率为 1.35

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较对照组[3.99 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]下降了 66%,较 A₂组[2.19 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]下降了 38%;而 A₃组真叶的光合速率为 1.95 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较对照组[3.51 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]下降了 44%,较 A₂组[2.04 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]仅下降了 4%。在同一盐浓度下,B₃组子叶的光合速率[0.83 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]较 A₃组下降了 57%,而真叶[1.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]仅下降了 9%。说明在复合盐碱胁迫下,子叶光合速率下降程度大于真叶且随着盐碱胁迫程度的加深,下降幅度更加显著。

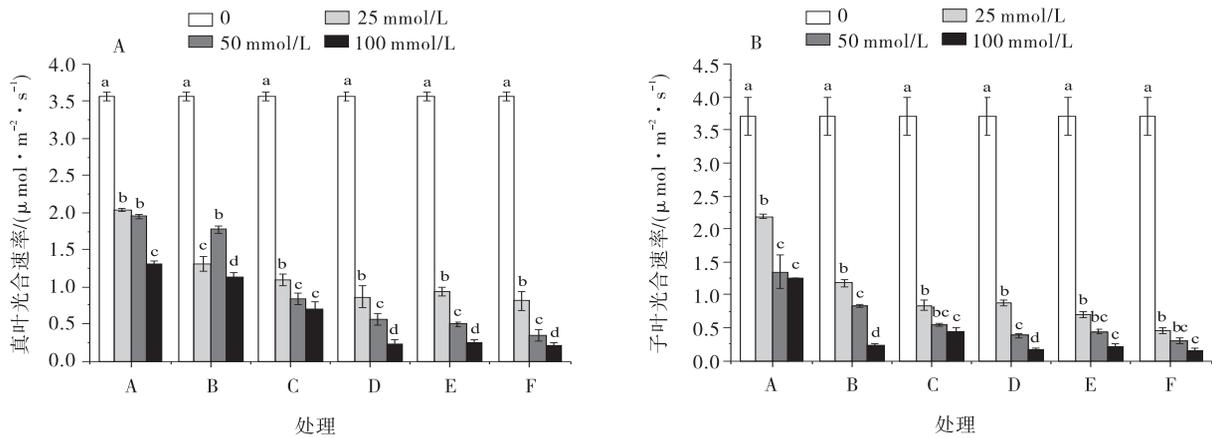


图 1 复合盐碱胁迫对真叶和子叶光合速率的影响

Fig. 1 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the photosynthetic rate in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

2.2 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗真叶与子叶胞间 CO₂浓度的影响

在同一处理组下,随着盐浓度的增加,除 A 处理组外,蓖麻真叶的胞间 CO₂浓度(图 2-A)不断下降,而子叶的胞间 CO₂浓度(图 2-B)呈波动变化。在不同处

理组下,随着碱浓度占比的增加,蓖麻幼苗真叶及子叶胞间 CO₂浓度先升高后变化不大。各处理组子叶胞间 CO₂浓度与对照组相比都有升高。如 C 组子叶胞间 CO₂浓度在各盐浓度下分别为 446、466、447 $\mu\text{L}/\text{L}$,相较于对照组(403 $\mu\text{L}/\text{L}$)都略有升高。

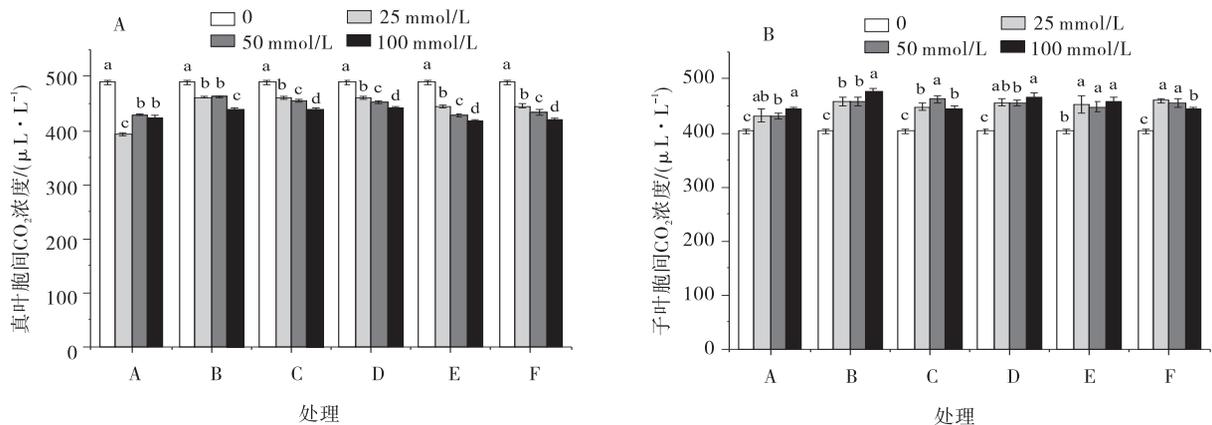


图 2 复合盐碱胁迫对真叶和子叶胞间 CO₂浓度的影响

Fig. 2 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the intercellular CO₂ concentration in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

2.3 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗真叶与子叶气孔导度的影响

在同一处理组下,随着盐浓度的增加,真叶(图3-A)与子叶(图3-B)气孔导度呈下降趋势。在低浓度和极端盐碱胁迫下(A₂、B₂和E₄、F₄),子叶下降幅度更大。在不同处理组下,随着碱浓度的增加,当盐浓度为25 mmol/L和100 mmol/L时(除A₂、B₂和E₄、F₄

外),真叶气孔导度波动较大,在D和C组达到最低点;当盐浓度为50 mmol/L时,真叶气孔导度波动趋于和缓。而子叶则相反,当盐浓度为25 mmol/L和100 mmol/L时,气孔导度波动较小,都在C组达到最高点;当盐浓度为50 mmol/L时,气孔导度波动较大。整体结果显示真叶气孔导度波动幅度更大。

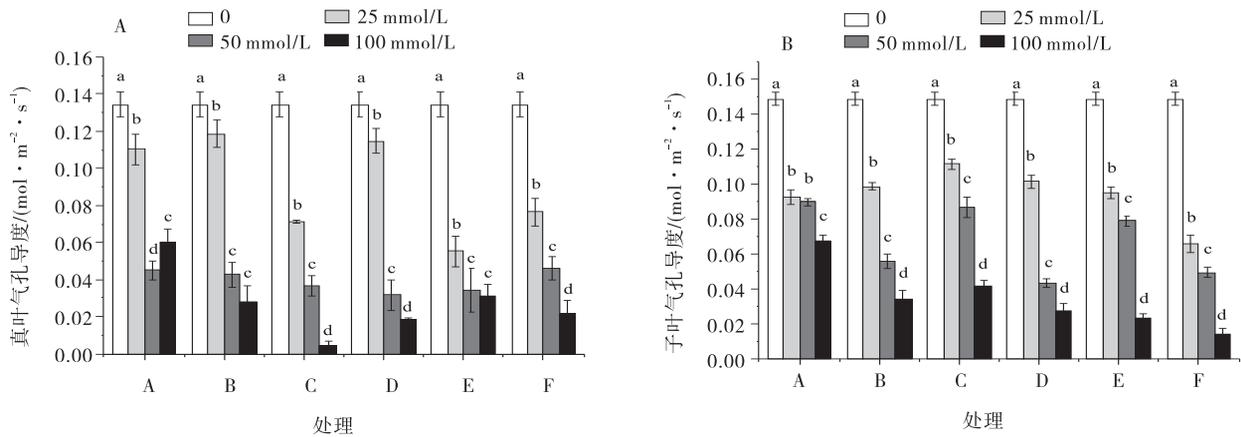


图3 复合盐碱胁迫对真叶和子叶气孔导度的影响

Fig. 3 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the stomatal conductance in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

2.4 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗真叶与子叶蒸腾速率的影响

在同一处理组下,随着盐浓度的增加,真叶(图4-A)与子叶(图4-B)的蒸腾速率都呈下降趋势,子叶蒸腾速率下降幅度更大。例如D组,随着盐浓度的增加,真叶的蒸腾速率分别为2.18、1.32、0.51和0.54 mmol/(m²·s);而子叶的蒸腾速率分别为2.45、1.79、

0.87和0.45 mmol/(m²·s),波动更大。而在不同处理组下,随着碱浓度的升高,在低盐浓度(25 mmol/L)下,子叶与真叶蒸腾速率都表现为先上升后下降;而在盐浓度高于25 mmol/L的情况下,都表现为先上升后下降趋势,且都在C组达到最大值。整体结果显示,随着复合盐碱胁迫的加深,子叶蒸腾速率变化幅度更大。

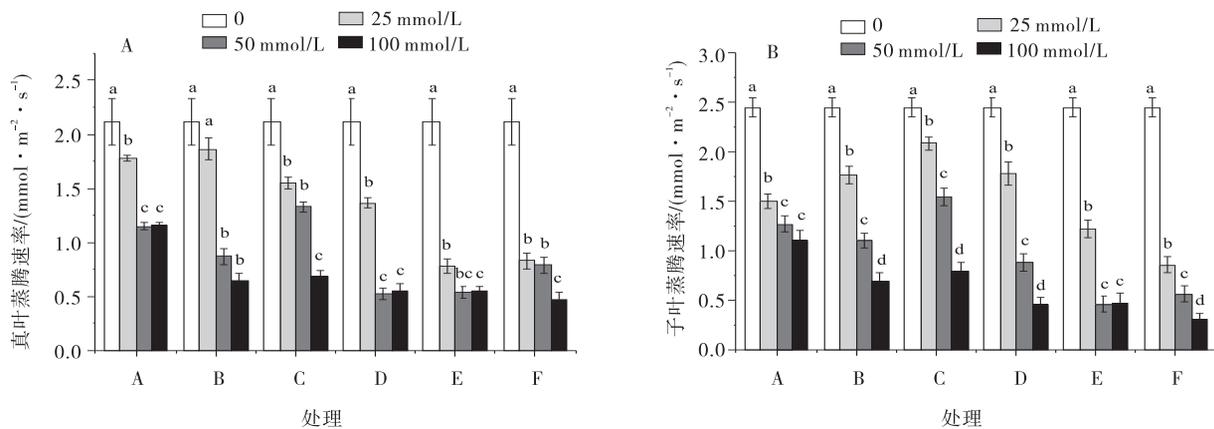


图4 复合盐碱胁迫对真叶和子叶蒸腾速率的影响

Fig. 4 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the transpiration rate in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

2.4 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗真叶与子叶光化学参数的影响

通过脉冲调制叶绿素荧光成像系统对蓖麻子叶与真叶的实际光化学效率(图5-A,图5-B)和光化学

淬灭系数(图6-A,图6-B)进行测定发现:蓖麻真叶与子叶实际光化学效率和光化学淬灭系数随着胁迫溶液盐浓度的升高都呈下降趋势。子叶的实际光化学效率较对照组下降幅度更大,例如A组,子叶组的A₂

(0.14)和 A_3 (0.09)较 A_1 (0.19)组分别下降了26%和53%,而真叶组只下降了17%和21%。而真叶的光化学淬灭系数整体较对照组下降更多,但是随盐碱浓度变化不大;而子叶的光化学淬灭系数随着盐碱浓度的升高波动幅度更大,如真叶和子叶的 E_3 (0.11和

0.12)较 D_3 (0.12和0.14)分别降低了8%和14%, F_4 (0.07和0.08)较 F_3 (0.09和0.15)分别降低了22%和47%(图6)。整体结果表明在复合盐碱胁迫下,子叶的实际光化学效率和光化学淬灭系数受到更大影响。

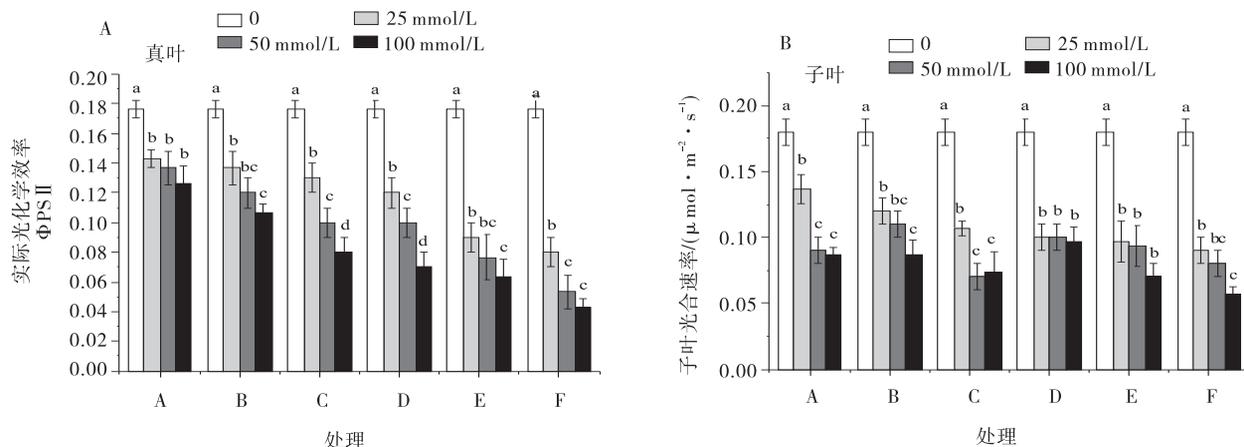


图5 复合盐碱胁迫对真叶和子叶 $\Phi PS II$ 的影响

Fig. 5 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the $\Phi PS II$ in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

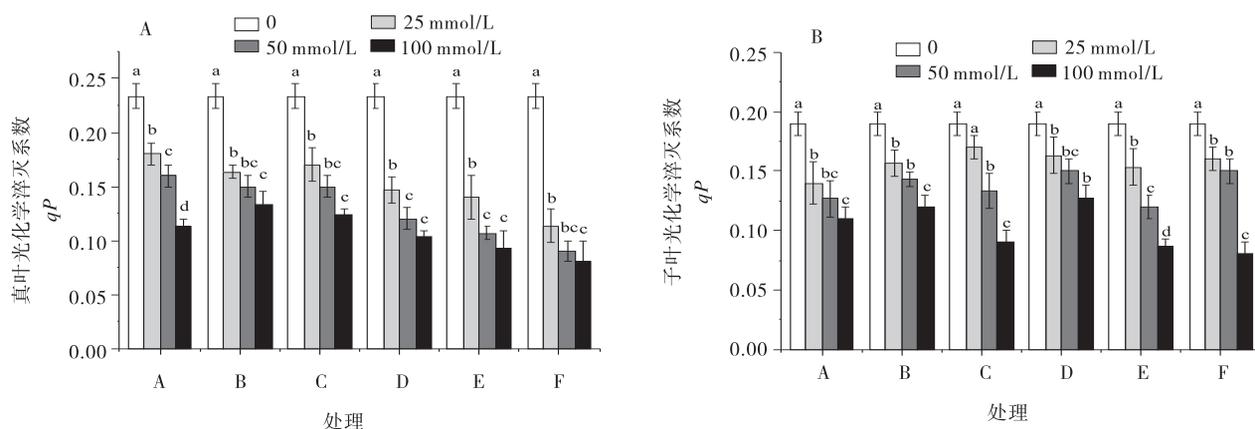


图6 复合盐碱胁迫对真叶和子叶 qP 的影响

Fig. 6 Effects of mixed salt-alkaline stresses on the qP in true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*

3 讨论

3.1 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗的协同效应

东北松嫩盐碱草原盐碱地为复合型盐碱地,既含有中性盐又含有碱性盐,植物的生长发育过程中面临的并非单纯的盐胁迫或碱胁迫,而是盐、碱交互的复合胁迫。在本试验模拟的东北松嫩盐碱退化草地环境中,中性盐 $NaCl$ 、 Na_2SO_4 与碱性盐 $NaHCO_3$ 、 Na_2CO_3 是土壤最主要的致害盐分。盐胁迫下细胞内钠离子的积累改变了钠钾离子比例,影响光合作用的生理过程^[12]。碱胁迫不仅会对植物造成渗透胁迫及离子毒害,还会带来pH胁迫^[13],影响植物光化学活

性,对光合作用产生影响^[14]。在本试验中,当蓖麻幼苗处于高浓度复合盐碱胁迫下时,其各项光合生理指标变化远大于盐或者碱胁迫。如真叶与子叶的光合速率在 D_4 、 E_4 及 F_4 处理组下较对照组下降了近90%,远小于 A_4 与 F_2 组。这表明高浓度的复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗光合作用的影响较单一的盐或碱胁迫更为严重,这与其他一些植物的研究结果相符^[15-17]。这可能是由于复合盐碱胁迫会破坏植物体内的离子平衡,根系周围的高pH值的环境使土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 $H_2PO_4^-$ 沉淀,影响植物根系对矿质营养的吸收^[18];而叶片对 Mg^{2+} 的吸收也受到影响,导致叶绿素的合成受阻,从而打破叶绿素合成与降解的动态平衡^[19];还有

研究表明植物的抗氧化系统和渗透调节也会受到负面影响^[20]。试验结果表明,复合盐碱胁迫对蓖麻的影响并不是二者简单的累加,而是具有明显的协同作用。

3.2 复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗光合生理的影响

本试验通过对不同胁迫下蓖麻子叶和真叶的生理指标进行测定,发现蓖麻子叶与真叶对复合盐碱胁迫具有不同程度的响应。在同一处理组下,随着盐浓度的增加,除子叶胞间CO₂浓度外,蓖麻幼苗真叶子叶各项光合生理参数都呈下降趋势,且子叶光合速率及光化学淬灭系数的下降幅度大于真叶。子叶胞间CO₂浓度升高可能是在盐碱胁迫下,为避免光合原料不足,子叶内向叶绿体运输的CO₂量增多。而在不同处理组下,随着碱浓度的增加,真叶子叶光合速率都下降,且子叶下降幅度显著大于真叶。光合速率和光化学淬灭系数是反映植物光合作用强度的重要指标,子叶的下降幅度更大,表明子叶受胁迫影响程度更深。

在复合盐碱胁迫下,真叶的气孔导度受影响较子叶更大,而子叶的蒸腾速率和光合速率变化幅度更大。当盐碱浓度较低时,子叶的气孔导度、蒸腾速率、光合速率和实际光化学效率变化更加敏感。研究发现,在盐胁迫下,气孔因素会导致光合速率降低^[21],而影响程度随胁迫程度而改变^[22]。同时,在轻度碱胁迫下,气孔因素也是导致光合速率降低的主要原因^[23]。推测在低浓度复合盐碱胁迫下,光合速率受气孔导度和蒸腾作用等气孔因素影响较大,故而子叶的光合速率和实际光化学效率变化较真叶更加敏感。表明子叶比真叶更快地响应复合盐碱胁迫。而在较高浓度的复合盐碱胁迫下,子叶的蒸腾速率、光合速率和光化学淬灭系数下降幅度更大,表明子叶受胁迫程度更大。且在极高浓度的盐碱胁迫下,子叶的气孔导度下降幅度也更大。研究发现,气孔导度及蒸腾速率的降低不仅代表受胁迫影响的程度,也代表着植物对盐碱胁迫的适应机制^[24],植物通过抑制气孔开放来减少光合及蒸腾作用消耗的能量^[25]。基于此推测在高浓度复合盐碱胁迫下,子叶的适应性更强。

4 结论

光合生理参数和叶绿素荧光参数的变化反映出复合盐碱胁迫对蓖麻幼苗子叶和真叶的生长和功能

都存在严重影响,且整体子叶受影响程度更深。而从子叶更快响应胁迫且受胁迫程度更大这一现象推测子叶在蓖麻幼苗响应盐碱胁迫中发挥更加重要的作用,使真叶受到的胁迫(如离子毒害、渗透胁迫等)降低从而更好地维持植物的生长发育。

参考文献:

- [1] 杨阳. 盐碱地—中国潜在的耕地资源[J]. 中国农村科技, 2018(11):8—13.
- [2] 毛恋, 芦建国, 江海燕. 植物响应盐碱胁迫的机制[J]. 分子遗传育种, 2020, 18(10):3441—3448.
- [3] 焦德志, 赵泽龙. 盐碱胁迫对植物形态和生理生化影响及植物响应的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20):1—4.
- [4] 刘凤歧, 刘杰淋, 朱瑞芬, 等. 4种燕麦对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 草业学报, 2015, 24(1):183—189.
- [5] 刘玉. 盐芥和拟南芥抗盐的生理生化机制研究[D]. 北京:中央民族大学, 2007.
- [6] 李源, 刘贵波, 高洪文, 等. 紫花苜蓿种质耐盐性综合评价及盐胁迫下的生理反应[J]. 草业学报, 2010, 19(4):79—86.
- [7] 吴成龙, 尹金来, 徐阳春, 等. 碱胁迫对菊芋幼苗生长及其光合作用和抗氧化作用的影响[J]. 西北植物学报, 2006(3):447—454.
- [8] 张奥, 张传领, 薛焱, 等. 碱、旱胁迫对乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2025, 45(1):173—181.
- [9] 郭瑞, 李峰, 周际, 等. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1):69—79.
- [10] 王艳树, 李凤山, 张玉霞, 等. 盐碱胁迫对蓖麻种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学, 2007(1):41—43. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2007.01.021.
- [11] 曾小龙. 蓖麻在逆境胁迫下的抗性及耐性机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4):123—125.
- [12] Sudhir P, Murthy S D S. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. *Photosynthetica*. 2004; 42(4):481—6.
- [13] Yang C, Chong J, Li C, *et al*. Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions[J]. *Plant & Soil*, 2007, 294(1/2):263—276.
- [14] Chen Y, Li Y, Sun P, *et al*. Interactive effects of salt and

- alkali stresses on growth, physiological responses and nutrient (N, P) removal performance of *Ruppia maritima* [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104:177–183.
- [15] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. *Plant Cell Environ.* 2002, 25:239–250.
- [16] Kitag. Shi D C, Wang D L. Effects of various salt–alkaline mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* (Trin.) [J]. *Plant Soil*, 2005, 271:15–26.
- [17] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 盐、碱胁迫对燕麦幼苗光合作用的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 155–160.
- [18] 鲁松, 杨楠, 熊铁一. 植物对盐碱胁迫的响应 [J]. *四川林业科技*, 2013, 34(6):93–95.
- [19] Guo R, Yang Z, Li F, *et al.* Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress [J]. *Bmc Plant Biology*, 2015, 15(1):170–183.
- [20] Chen Y, Li Y, Sun P, *et al.* Interactive effects of salt and alkali stresses on growth, physiological responses and nutrient (N, P) removal performance of *Ruppia maritima* [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104:177–183.
- [21] Zheng Y H, Xu X B, Wang M Y, *et al.* Responses of salt–tolerant and intolerant wheat genotypes to sodium chloride: Photosynthesis, antioxidants activities, and yield. *Photosynthetica*, 2009, 47(1):87–94
- [22] Saeedipour S. Effect of drought at the post–anthesis stage on remobilization of carbon reserves in two wheat cultivars differing in senescence properties [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(18):3549.
- [23] 白健慧. 燕麦对盐碱胁迫的生理响应机制研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [24] Clark H, Newton P C D, Barker D J. Physiological and morphological responses to elevated CO₂ and a soil moisture deficit of temperate pasture species growing in an established plant community [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50:233–242.
- [25] 李晓宇, 蔺吉祥, 李秀军, 等. 羊草苗期对盐碱胁迫的生长适应及 Na⁺、K⁺ 代谢响应 [J]. *草业学报*, 2013, 22(1):201–209.

Synergistic effects of salt and alkaline stresses on the photosynthetic physiology of early seedlings of *Ricinus communis*

WANG Hao-chu, HU Qi-han, TENG Shu-yu, WANG Yu-meng, LI Shi-hao,
LI Yue-ming, LIN Ji-xiang*

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of complex saline–alkali stress on the photosynthetic capacity of cotyledons and true leaves in *Ricinus communis* seedlings during the early growth stage. [Method] The early seedlings of the energy plant *Ricinus communis* were taken as research material. To simulate the complex saline–alkali stress conditions of soil, NaCl and Na₂SO₄ were induced using different molar ratios. Similarly, alkaline stress was simulated by mixing NaHCO₃ and Na₂CO₃ with different molar ratios. Six groups (A to F) with six alkali concentration treatments were designed, and three salt concentrations (25, 50, 100 mmol/L) were applied within each group. The photosynthetic physiological indexes and chlorophyll fluorescence parameters of *Ricinus communis* were measured under 18 kinds of salinity and alkalinity. [Result] Increasing salt and alkali stress led to a general decline in photosynthetic physiological parameters and chlorophyll fluorescence parameters in both true leaves and cotyledon of *Ricinus communis*, with the exception of intercellular CO₂ concentration in cotyledon. Notably, photosynthetic rate de-

creased significantly when the salt concentration exceeded 25 mmol/L. The stomatal conductance of true leaves exhibited a more pronounced decline, while the transpiration rate, photosynthetic rate, Φ PS II and qP of cotyledon leaf decreased more significantly, especially under high salt and alkali stress. Such changes are more pronounced under high salt stress conditions, such as at the highest concentration (F4) of stress. At the highest stress level (F4) the qP of cotyledons decreased by 47% compared to the previous concentration gradient (F3), while the decrease in true leaves was 22%. **【Conclusion】**The findings suggest that the mixed salinity—alkalinity stresses significantly impacts growth and physiological function of both cotyledon and true leaves in *Ricinus communis* seedlings. The greater sensitivity observed in cotyledon suggests that cotyledon plays a more important role in response to mixed salinity—alkalinity stresses of *Ricinus communis* seedlings, thereby reducing the stress on true leaves to better maintain the growth and development of plants.

Key words: *Ricinus communis*; cotyledon; true leaf; salt and alkali stress; photosynthetic physiology

(责任编辑:刘建荣)