

网络出版时间:2022-03-05 08:51 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.09.014
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220302.1214.001.html

外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发及幼苗生长的影响

华智锐^{1,2}

(1 商洛学院 生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛 726000;
2 陕西秦岭特色生物资源产业技术研究院有限公司, 陕西 商洛 726000)

【摘 要】【目的】研究外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发及幼苗生长的影响,为盐碱地区千屈菜大规模优质高产种植提供参考。【方法】以千屈菜种子为试验材料,将消毒并浸泡 24 h 的千屈菜种子随机分成 6 组,每组 50 粒,整齐排列在直径为 12 cm、垫有 2 层滤纸的培养皿中,其中 1 组用移液器添加蒸馏水 20 mL,记为 CK1 处理;另外 5 组先添加 10 g/L NaCl 10 mL,再分别添加 0,1,3,5,7 g/L 外源甜菜碱 10 mL,依次记为 CK2、T1、T2、T3 和 T4 处理,置于 25 ℃ 温室培养,统计种子发芽指标。再选取株高 10~15 cm、生长状况基本一致的千屈菜幼苗进行盆栽试验,设 CK1、CK2、T1、T2、T3 和 T4 6 个处理,其中 CK1 处理不添加任何药品,进行蒸馏水正常培养;CK2 处理先用 10 g/L NaCl 10 mL 进行浇灌,再叶面喷施蒸馏水 10 mL;T1、T2、T3 和 T4 处理均先用 10 g/L NaCl 10 mL 进行浇灌,再分别用 1,3,5,7 g/L 外源甜菜碱 10 mL 喷洒于叶片上,隔天喷洒 1 次,处理 7 d 后随机选取千屈菜幼苗,测定其生长指标及叶片中叶绿素、保护酶(SOD、POD 和 CAT)活性及 MDA 和可溶性蛋白含量。【结果】在 NaCl 胁迫下,外源甜菜碱能使千屈菜种子萌发指标升高,幼苗生长指标、叶绿素含量和保护酶活性增强,可溶性蛋白含量增加且维持在正常水平,从而缓解盐胁迫对千屈菜植株生长发育的抑制程度及危害;随外源甜菜碱质量浓度升高,各指标均呈现先升后降的变化趋势,且甜菜碱质量浓度为 5 g/L 时,其对千屈菜种子的萌发率,幼苗的根长、株高、鲜质量和干质量及叶片总叶绿素含量,POD、SOD、CAT 活性,MDA 含量的改善效果最为显著,较 CK2 处理分别增加了 96.50%,49.35%,22.60%,61.67%,52.01%,300.73%,156.72%,191.67%,99.43%,57.69%;甜菜碱质量浓度为 3 g/L 时,盐胁迫下千屈菜幼苗可溶性蛋白含量最高,较 CK2 处理增加了 628.66%。【结论】喷施 5 g/L 的外源甜菜碱可增强千屈菜种子及幼苗的耐盐性。

【关键词】 千屈菜;甜菜碱;盐胁迫;种子萌发;幼苗生长;逆境生理
【中图分类号】 S567.239 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2022)09-0119-08

Effects of exogenous glycine betaine on *Lythrum salicaria* seed germination and seedling growth under salt stress

HUA Zhirui^{1,2}

(1 College of Biology Pharmacy and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;
2 Shaanxi Qinling Industrial Technology Research Institute of Special Biological Resources Co. Ltd, Shangluo, Shaanxi 726000, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of exogenous betaine on seed germination and seedling growth of *Lythrum salicaria* under salt stress to provide reference for large-scale high-quality and high-yield planting of *Lythrum salicaria* in saline-alkali area. 【Method】 The seeds and seedlings of *Lythrum salicaria* were arranged neatly in a petri dish with a diameter of 12 cm and two layers of filter paper. The seeds were randomly divided into 6 groups with 50 seeds in each group. The first group was added 20

mL of distilled water with pipette, denoted as CK1. The other 5 groups were added 10 mL of 10 g/L NaCl with pipette, and then 10 mL of exogenous betaine was added at concentrations of 0, 1, 3, 5 and 7 g/L as treatments of CK2, T1, T2, T3 and T4, respectively. All treatments were cultured at 25 °C with 10 mL distilled water added every day to prevent drought, and germination number was counted. A total of 6 groups were treated for seedlings at heights of 10—15 cm with 3 pots in each group and 6 plants in each pot. CK1 was cultured with distilled water without any drugs. CK2 treatment was irrigated with 10 g/L NaCl 10 mL, followed by 10 mL distilled water. T1, T2, T3 and T4 were irrigated with 10 g/L NaCl 10 mL, and then sprayed with 10 mL exogenous betaine at concentrations of 1, 3, 5 and 7 g/L on leaves, once every other day. After 7 days, the growth indexes, contents of chlorophyll, soluble protein and MDA and activities of SOD, POD and CAT were measured. 【Result】 Under NaCl stress, exogenous betaine promoted willow vegetable seed germination rate, seedling anti-oxidation ability, enhance photosynthesis, and soluble protein content, so as to relieve inhibition and harm of salt stress on plant growth and development. With increase of exogenous betaine concentration, all indicators showed the trend of first increase and then decrease. When betaine concentration was 5 g/L, seed germination rate, root length, plant height, fresh weight, dry weight, chlorophyll content, POD, SOD and CAT activities, MDA content of seedling leaves had the most significant effects with increases of 96.50%, 49.35%, 22.60% and 61.67%, 52.01%, 300.73%, 156.72%, 191.67%, 99.43% and 57.69% in comparison with CK2. The soluble protein content reached the highest when betaine mass concentration was 3 g/L with the increase rate of 628.66% in comparison with CK2. 【Conclusion】 Spraying 5 g/L exogenous betaine can enhance salt tolerance of seeds and seedlings of lythyl-andine.

Key words: *Lythrum salicaria*; exogenous betaine; NaCl stress; seed germination; seedling growth; stress physiology

千屈菜(*Lythrum salicaria* L.), 别名对叶莲、光千屈菜、型千屈菜、水枝柳、水柳, 系千屈菜科千屈菜属多年生草本植物, 是中医常用药, 其全草均可入药, 内用可治肠炎、痢疾、便血, 外用于外伤出血^[1]。千屈菜喜强光, 耐寒性强, 喜水湿, 对土壤要求不高, 因此千屈菜作为盐碱地重要的观赏性植物, 开展其耐盐碱生理机制研究意义重大。

土壤盐碱化是阻碍全球作物生长和生产力的主要非生物限制因素, 是造成世界耕地退化和土地荒漠化的主要因素之一^[2]。研究表明, 植物为了抵御和适应盐碱胁迫形成了一系列适应盐碱胁迫的生理生化机制, 包括渗透调节、离子区域化、提高抗氧化能力、改变光合途径和调节植物激素等^[3], 其中渗透调节是植物适应盐碱胁迫的主要生理机制。甘氨酸甜菜碱(glycine betaine, GB), 简称甜菜碱(beta-ine)^[4], 是广泛存在于植物体内的生物碱, 可调节细胞渗透压, 具有维持生物膜完整性的作用。研究证明, 在遭受盐胁迫时, 许多植物体内都会积累甜菜碱^[5], 但由于积累不足而作用较弱, 因此人为外施 GB 可提高植物抗逆性^[6]。周泉澄等^[7]研究发现, 外施 GB 能有效提高盐角草和毕氏海蓬子种子的萌发

率和耐盐性, 对于其在盐胁迫下的生长发育具有明显促进作用; 李善家等^[8]研究发现, 甜菜碱对盐胁迫下黑果枸杞种子萌发具有显著促进作用; 马婷燕等^[9]研究发现, 叶施 GB 不仅有效提高了紫花苜蓿种子及幼苗的抗盐能力, 而且还能促进紫花苜蓿在盐渍环境下的生长发育; 钟国辉等^[10]研究发现, 外源甜菜碱削弱盐胁迫下白菜叶片细胞的膜脂过氧化、膜透性和过氧化物酶(POD)活性增加的程度, 延缓白菜叶片中叶绿素、可溶性蛋白含量和相对含水量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性的下降; 呼彧等^[11]研究发现, 适宜浓度的 GB 能使高温胁迫下菜豆幼苗丙二醛(MDA)含量降低, 可溶性蛋白含量和保护酶活性提高。

目前关于千屈菜生理抗性方面的研究较少, 且外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发和幼苗生长影响的研究尚无报道。为此, 本研究以千屈菜为材料, 采用 NaCl 溶液模拟盐胁迫, 设置不同质量浓度外源甜菜碱, 对盐胁迫下千屈菜种子和盆栽幼苗进行处理, 通过测定不同处理下千屈菜种子萌发及幼苗生长过程中的相关指标, 探究外源甜菜碱缓解 NaCl 对千屈菜胁迫的生理机制, 旨在为盐碱地区千

屈菜大规模优质高产种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用千屈菜种子采自商洛镇安木王国家森林公园,经商洛学院王新军教授鉴定为千屈菜科千屈菜属千屈菜(*Lythrum salicaria* L.)的干燥成熟种子。

选择大小一致、籽粒饱满的种子进行试验;幼苗进行移栽时,选取株高为 10~15 cm、生长状况基本一致的幼苗移栽至塑料花盆中,定时浇水松土,待其恢复到正常生理状态再进行后续试验处理。

1.2 试验方法

1.2.1 种子发芽盐胁迫阈值的确定 千屈菜种子用去离子水多次冲洗后,于体积分数 70%乙醇溶液中浸泡 30 s,然后用质量分数 0.1% KMnO₄ 溶液消毒 10 min^[12],再用无菌水洗多次。最后将种子置于无菌水中浸泡 24 h,以保障种子发芽过程所需水分。

取浸泡后的种子随机分成 5 组,每组 50 粒,整齐排列在直径 12 cm、垫有 2 层滤纸的培养皿中,用移液器分别添加质量浓度为 0,2.5,5,10,15 g/L 的 NaCl 溶液 10 mL 到培养皿中进行盐胁迫种子萌发预试验:25 ℃温室培养,每天补充 10 mL 蒸馏水防止干旱,记录发芽数,每组 3 次重复,7 d 后以千屈菜种子发芽率(NaCl 质量浓度为 10 和 15 g/L 时种子发芽率分别为 50.6%和 5.57%)和幼苗生物量下降到 50%时的盐质量浓度得出盐胁迫阈值质量浓度为 10 g/L。

1.2.2 种子发芽试验 采用纸上发芽法^[13],将消毒并浸泡 24 h 的千屈菜种子随机分成 6 组,每组 50 粒,整齐排列在直径 12 cm、垫有 2 层滤纸的培养皿中。其中 1 组用移液器添加蒸馏水 20 mL,记为对照处理(CK1),另外 5 组先用移液器加 10 g/L NaCl 10 mL,再分别加入 0,1,3,5,7 g/L 甜菜碱 10 mL,依次记为 CK2、T1、T2、T3、T4 处理。然后置 25 ℃温室中培养,每天加入 10 mL 蒸馏水,统计发芽数。每组重复 3 次。

1.2.3 盆栽试验 选取株高为 10~15 cm、生长状况基本一致的千屈菜幼苗移栽至塑料花盆中进行盆栽处理,外源甜菜碱采用叶施的方式添加,共 6 个处理,每处理 3 盆,每盆 6 株。CK1 处理:不添加任何药品,进行蒸馏水正常培养;CK2 处理:先用 10 mL 10 g/L NaCl 进行浇灌,再叶面喷施 10 mL 蒸馏水;

T1~T4 处理:均先用 10 mL 10 g/L NaCl 进行浇灌,再分别用 1,3,5,7 g/L 外源甜菜碱 10 mL 喷洒于叶片上,隔天喷洒 1 次,CK1 和 CK2 对应喷洒蒸馏水 10 mL。处理 7 d 后随机选取千屈菜幼苗用于生长指标测定,叶片用于相关生理指标测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 种子萌发指标 进行发芽试验时,需要每天记录发芽种子数,7 d 时分析发芽势,10 d 时统计发芽率,并分析发芽指数和活力指数。

发芽率=发芽种子数/供试总种子数×100%;

发芽势=发芽高峰期发芽种子数/供试总种子数×100%;

发芽指数(GI)=∑(Gt/Dt);

活力指数(VI)=S∑(Gt/Dt)=S×GI。

式中:Dt 为发芽日数;Gt 为与 Dt 相对应的每天发芽种子数;S 为种苗生长量。

1.3.2 幼苗生长指标和生理指标测定 采用直尺测定幼苗根长(cm)和株高(cm),采用天平测定幼苗鲜质量(g/株)和干质量(g/株)。采用丙酮提取法^[14]测定叶绿素含量,采用氮蓝四唑法^[15]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法^[16]测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外吸收法^[16]测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用硫代巴比妥酸(TBA)检测法^[14]测定丙二醛(MDA)含量,采用考马斯亮蓝法^[17]测定可溶性蛋白含量。各项指标重复测定 3 次,取平均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据统计,采用 SPSS statistics 22.0 软件进行方差分析,采用 Origin 8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发的影响

由表 1 可知,与 CK2 处理相比,外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发指标(发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数)均有显著提高作用,且不同质量浓度甜菜碱处理间差异显著,随着甜菜碱质量浓度增加,盐胁迫下千屈菜种子萌发指标均呈先升高后降低的变化趋势,在甜菜碱质量浓度为 5 g/L(T3 处理)时,其对盐胁迫下千屈菜种子的各萌发指标均达到最大值。表明 5 g/L 甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发促进作用最佳。

表 1 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发的影响

Table 1 Effects of exogenous betaine on *Lythrum salicaria* seed germination under salt stress

处理 Treatment	发芽率/% Germination percentage	发芽势/% Germination vigor	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
CK1	99.30±0.265 a	98.35±0.036 a	57.13±0.026 a	0.055 6±0.000 4 a
CK2	50.60±0.529 f	46.87±0.026 f	27.22±0.026 f	0.005 7±0.000 3 f
T1	62.20±0.473 e	58.96±0.036 e	39.71±0.036 e	0.010 3±0.000 4 e
T2	84.90±0.404 d	82.65±0.095 d	46.33±0.036 c	0.023 1±0.003 7 c
T3	96.50±0.265 b	94.26±0.010 b	53.67±0.062 b	0.052 6±0.000 3 b
T4	87.30±0.361 c	85.73±0.044 c	44.85±0.026 d	0.021 5±0.000 1 d

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗生长的影响

由表 2 可知,与 CK1 处理相比,在盐胁迫处理(CK2)下,千屈菜幼苗的根长、株高、鲜质量和干质量均显著降低。与 CK2 相比,添加不同质量浓度外源甜菜碱(T1~T4 处理)后,盐胁迫下千屈菜幼苗

各生长指标均不同程度升高,且外源甜菜碱质量浓度为 5 g/L(T3 处理)时,盐胁迫下千屈菜幼苗的根长、株高、鲜质量和干质量增加幅度最大,分别增加了 49.35%,22.60%,61.67%,52.01%,表明适量外源甜菜碱可以有效缓解盐胁迫对千屈菜幼苗生长的影响,且添加 5 g/L 甜菜碱的缓解效果最佳。

表 2 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗生长的影响

Table 2 Effects of exogenous betaine on growth indexes of *Lythrum salicaria* seedlings under salt stress

处理 Treatment	根长/cm Root length	株高/cm Shoot length	鲜质量/(g·株 ⁻¹) Fresh mass	干质量/(g·株 ⁻¹) Dry mass
CK1	12.30±0.035 a	18.35±0.032 a	1.11±0.006 a	0.106 0±0.000 3 a
CK2	7.70±0.023 f	14.87±0.024 f	0.60±0.005 f	0.059 6±0.000 3 f
T1	8.50±0.054 e	15.86±0.031 e	0.68±0.006 e	0.068 3±0.000 4 e
T2	9.20±0.074 d	16.67±0.055 d	0.83±0.004 c	0.081 7±0.000 4 c
T3	11.50±0.043 b	18.23±0.013 b	0.97±0.012 b	0.090 6±0.000 2 b
T4	10.70±0.021 c	17.73±0.052 c	0.75±0.005 d	0.074 5±0.000 2 d

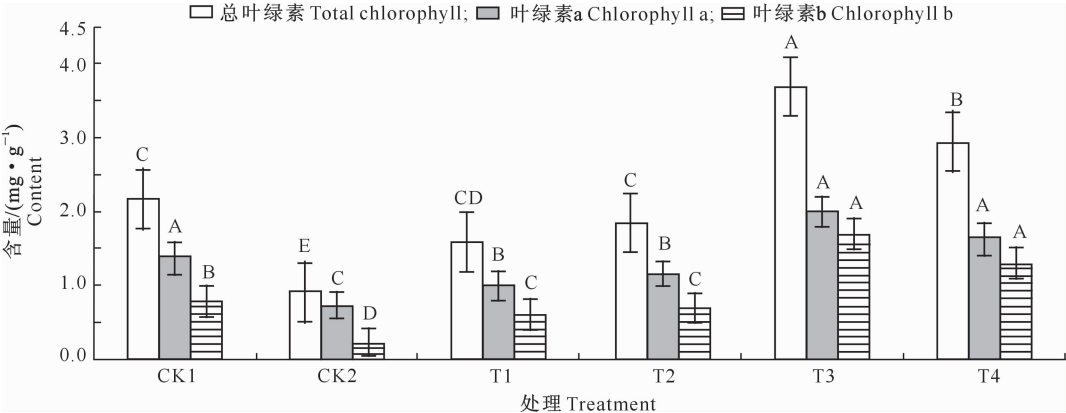
2.3 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗叶绿素含量的影响

由图 1 可知,与 CK1 处理相比,在 10 g/L NaCl 胁迫(CK2 处理)下,千屈菜幼苗叶片中总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量均极显著下降($P<0.01$)。与 CK2 处理相比,添加不同质量浓度外源甜菜碱(T1~T4 处理)后,盐胁迫下千屈菜幼苗的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量均有不同程度升高,其中千屈菜幼苗总叶绿素含量分别增加了 73.01%,100.09%,300.73%,218.54%,叶绿素 a 含量分别增加了 38.71%,60.28%,178.96%,129.66%,叶绿素 b 含量分别增加了 284.17%,331.61%,820.91%,622.54%。在 NaCl 胁迫下,随着添加外源甜菜碱质量浓度的升高,千屈菜幼苗总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量整体上均呈先上升后下降的变化趋势;与 CK2 处理相比,在甜菜碱质量浓度为 5 g/L(T3 处理)时,千屈菜幼苗总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量增幅达到最大,说明添加 5 g/L 甜菜碱对提高盐胁迫下千屈菜幼苗叶绿素含量作用最显

著。
2.4 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗保护酶活性的影响

由图 2 可知,与 CK1 处理相比,在 10 g/L NaCl 胁迫(CK2 处理)下,千屈菜幼苗 POD、SOD 和 CAT 活性均急剧变化,其中 POD 和 SOD 活性均极显著增强($P<0.01$),而 CAT 活性极显著下降($P<0.01$)。与 CK2 处理相比,添加不同质量浓度外源甜菜碱(T1~T4 处理)均能使盐胁迫下千屈菜幼苗 3 种保护酶活性不同程度增强,其中 POD 活性分别增加 43.28%,82.09%,156.72%和 116.42%,SOD 活性分别增加 66.67%,141.67%,191.67%和 108.33%,CAT 活性分别增加 24.38%,57.14%,99.43%和 65.14%。在 NaCl 胁迫下,随着添加外源甜菜碱质量浓度的升高,千屈菜幼苗 3 种保护酶活性整体呈先上升后下降的趋势;与 CK2 处理相比,在甜菜碱质量浓度为 5 g/L(T3 处理)时,千屈菜幼苗 3 种保护酶活性增幅均达到最大,说明添加 5 g/L 甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗生长的缓解作

用最显著。



图柱上标不同大写字母表示同一指标不同处理间差异极显著。下同
Different capital letters indicate extremely significant difference among treatments. The same below

图 1 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗叶绿素含量的影响
Fig. 1 Effect of GB on chlorophyll content of *Lythrum salicaria* seedlings under salt stress

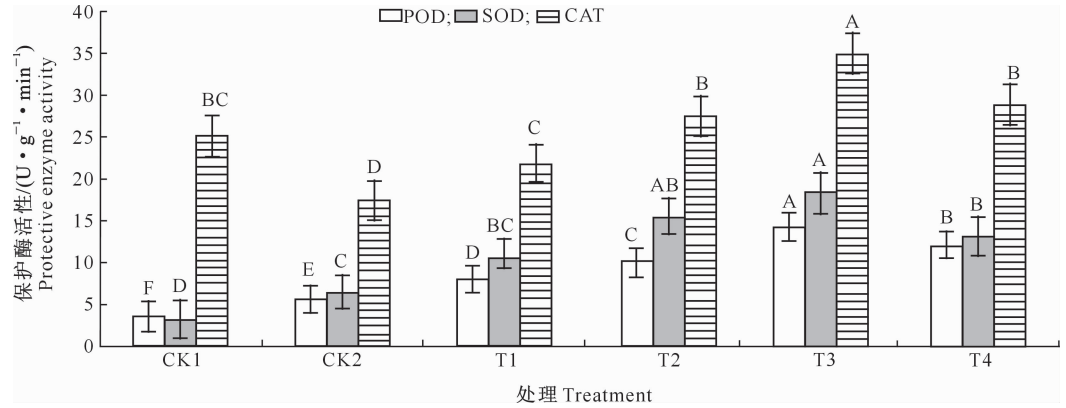


图 2 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗保护酶活性的影响
Fig. 2 Effect of GB on protective enzyme activity of *Lythrum salicaria* seedlings under salt stress

2.5 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗 MDA 含量的影响

由图 3 可知,与 CK1 处理相比,在 10 g/L NaCl 胁迫(CK2 处理)下,千屈菜幼苗 MDA 含量极显著增加($P<0.01$)。与 CK2 处理相比,添加不同质量浓度外源甜菜碱(T1~T4 处理)均能使千屈菜幼苗中 MDA 含量不同程度降低,且随着添加外源甜菜碱质量浓度的升高,千屈菜幼苗叶片中 MDA 含量整体上呈先下降后上升的变化趋势;T1~T4 处理千屈菜幼苗中 MDA 含量分别较 CK2 处理降低了 9.96%,28.66%,57.69%和 31.67%,且 T3 处理千屈菜幼苗中 MDA 含量极显著低于 T1、T2 和 T4 处理。表明甜菜碱可以缓解盐胁迫对千屈菜幼苗所造成的危害作用,且添加甜菜碱质量浓度为 5 g/L 时效果最佳。

2.6 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

由图 4 可知,与 CK1 处理相比,在 10 g/L NaCl 胁迫(CK2 处理)下,千屈菜幼苗中可溶性蛋白含量极显著降低($P<0.01$)。与 CK2 处理相比,添加不同质量浓度外源甜菜碱(T1~T4 处理)均能使盐胁迫下千屈菜幼苗中可溶性蛋白含量增加,且随着添加外源甜菜碱质量浓度的升高,千屈菜幼苗叶片中可溶性蛋白含量整体上呈先上升后下降的变化趋势,其中 T1~T4 处理千屈菜幼苗中可溶性蛋白含量分别增加了 224.76%,628.66%,530.94%和 420.20%,且 T2 处理(甜菜碱质量浓度为 3 g/L)千屈菜幼苗中可溶性蛋白含量显著高于 T1、T3、T4 处理,即添加甜菜碱质量浓度为 3 g/L 时,千屈菜幼苗叶片中可溶性蛋白含量增幅最大,说明甜菜碱可

以缓解盐胁迫对千屈菜幼苗所造成的抑制作用,且

在质量浓度为 3 g/L 时效果最显著。

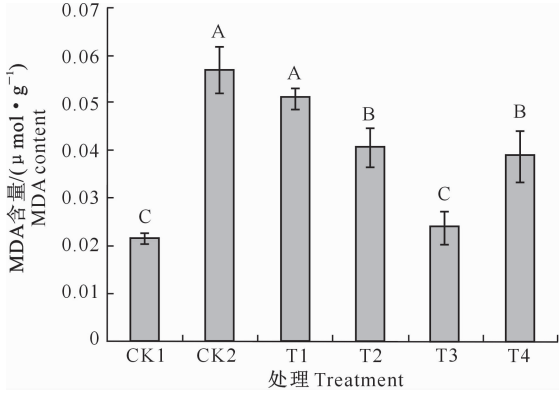


图 3 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effect of GB on MDA content of *Lythrum salicaria* seedlings under salt stress

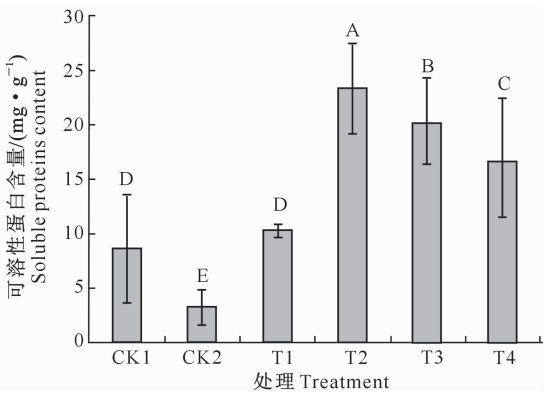


图 4 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig. 4 Effect of GB on soluble proteins content of *Lythrum salicaria* seedlings under salt stress

3 讨 论

3.1 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发的影响

种子萌发期是植物生活史中最重要的阶段,也是耐盐性最差的阶段。研究表明,盐胁迫下添加外源甜菜碱会明显改善向日葵^[18]、番茄^[19]和白三叶^[20]种子的萌发情况。肖斌等^[21]研究发现,盐胁迫明显降低了罗布麻和大花白麻种子的发芽率、发芽势;范春丽等^[22]研究发现,外源甜菜碱能有效促进盐胁迫下石榴种子萌发。本研究发现,在 NaCl 胁迫下,千屈菜种子萌发指标均呈下降趋势,但在添加不同质量浓度外源甜菜碱后,其萌发指标均有所上升,且在甜菜碱质量浓度为 5 g/L 时千屈菜种子萌发指标达到最高,说明外源甜菜碱能有效提高千屈菜种子的抗盐胁迫能力,这与前人的研究结果相一致。

3.2 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜幼苗生长的影响

盐胁迫对植物最普遍、最显著的影响就是抑制其生长,生长特性是植物对盐胁迫伤害的综合反应。研究表明,外源甜菜碱可以缓解盐胁迫对植物生长的抑制作用^[23]。本研究结果表明,与 CK1 处理相比,盐胁迫(CK2 处理)显著抑制了千屈菜幼苗的生长,这与孙焕荣等^[24]对荷兰菊、千屈菜及狼尾草的研究结果一致。本研究中,添加不同质量浓度 GB 后盐胁迫下千屈菜幼苗的根长、株高、鲜质量和干质量与 CK2 处理相比均呈现出不同程度提高,且在 GB 质量浓度为 5 g/L 时,千屈菜幼苗各生长指标均达到最高,缓解效果最明显。

POD、SOD 和 CAT 是植物抗氧化系统中的主

要酶,外界逆境对植物体造成的影响程度都可以通过测定 POD、SOD 和 CAT 的活性来判定。丁能飞等^[25]研究发现,大白菜经 NaCl 胁迫后其抗氧化酶活性急剧增加;唐露^[26]研究发现,外源甜菜碱能有效提高渗透胁迫下香蕉幼苗叶片和根系中抗氧化酶活性。本研究结果表明,在 10 g/L NaCl 胁迫下,千屈菜幼苗 POD 和 SOD 活性均显著升高,而 CAT 活性下降,这可能是在短时间内处理时 CAT 活性受到抑制所致。但添加不同质量浓度 GB 后,千屈菜幼苗叶片 POD、SOD 和 CAT 活性均比 CK2 明显增高,这与前人的研究结果一致,说明外源甜菜碱对植物的抗氧化能力具有显著提高作用,可有效缓解盐胁迫对植物造成的抑制作用,且添加 5 g/L GB 效果最显著。

在盐胁迫下,植物体内会积累较多的活性氧,导致膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量增加,进一步破坏质膜的结构和完整性。因此,MDA 含量能在一定程度上反映植物细胞膜受损伤程度。陈锦芬等^[27]研究发现,在盐胁迫下烟草 MDA 含量显著上升;马婷燕等^[9]研究发现,外源甜菜碱能显著降低盐胁迫下紫花苜蓿幼苗中 MDA 含量。本研究结果表明,在 NaCl 胁迫时千屈菜幼苗中 MDA 含量显著增高,而在添加不同质量浓度外源甜菜碱后,MDA 含量均有不同程度降低,这与前人的研究结论一致,且在 5 g/L GB 时 MDA 含量最低。说明外源甜菜碱能有效降低植物细胞膜的受损程度,且 5 g/L GB 处理效果最佳。

叶绿素是绿色植物进行光合作用的主要色素,其含量能在一定程度上反映植物的同化能力,也可

作为衡量叶片受损程度的指标。郑容妹等^[28]发现,盐胁迫显著降低了沿海绿竹的叶绿素含量;杨晓云等^[29]发现,外源甜菜碱能有效提高盐胁迫下玉米幼苗中叶绿素含量。本研究结果表明,盐胁迫显著降低了千屈菜幼苗叶片叶绿素含量,但添加适宜质量浓度外源甜菜碱后能有效提高盐胁迫下千屈菜幼苗的叶绿素含量,这与前人研究结论一致。

可溶性蛋白是一种重要的渗透调节物质,低质量浓度 NaCl 胁迫可促进植物可溶性蛋白的合成以适应盐环境,但随着 NaCl 质量浓度的增加,当胁迫达到一定程度时,可溶性蛋白的合成受到严重抑制,含量明显下降。王国霞等^[30]发现,施加外源甜菜碱显著增加了低温胁迫下油茶可溶性蛋白含量;张涛^[31]发现,在盐胁迫下花椒树叶片可溶性蛋白含量先升高后降低,当盐质量浓度达到一定程度时,植物体内合成可溶性蛋白的组织或者酶类就会失活,从而使花椒树的自我调节能力受到抑制。本研究发现,对盐胁迫下千屈菜幼苗添加不同质量浓度的甜菜碱后,其可溶性蛋白含量均有不同程度增高。说明外源甜菜碱可诱导可溶性蛋白进一步合成,对植物体盐胁迫抑制有一定的缓解作用,且 3 g/L GB 效果最佳。

4 结 论

本研究以 NaCl 模拟盐胁迫条件,添加 5 g/L 外源甜菜碱能有效提高盐胁迫下千屈菜种子萌发和幼苗生长,促进幼苗叶片中叶绿素和可溶性蛋白(3 g/L GB 时效果最佳)的形成,提高 POD、SOD 和 CAT 活性,降低 MDA 含量,有效缓解盐胁迫对千屈菜种子萌发和幼苗生长的抑制作用。本研究仅开展了千屈菜种子萌发及幼苗盆栽处理试验中部分生理生化指标的测定,还有待进一步开展大田生产栽培实践进行探讨。

〔参考文献〕

[1] 张 晴,刘 芳.千屈菜提取物药理作用的研究进展[J].华西药学杂志,2018,33(2):219-223.
Zhang Q,Liu F. Research progress on pharmacological effects of lythrum extract [J]. West China Journal of Pharmacy,2018,33(2):219-223.

[2] 彭 程.盐胁迫对植物的影响及植物耐盐研究进展[J].山东商业职业技术学院学报,2014,14(2):123-128.
Peng C. Advances in research on effects of salt stress on plant and adaptive mechanism of the plant to salinity [J]. Journal of Shandong Institute of Commerce and Technology,2014,14(2):123-128.

[3] 许盼云,吴玉霞,何天明.植物对盐碱胁迫的适应机理研究进展[J].中国野生植物资源,2020,39(10):41-49.
Xu P Y,Wu Y X,He T M. Research progress on adaptation mechanism of plants to saline-alkali stress [J]. Chinese Wild Plant Resources,2020,39(10):41-49.

[4] 刘俊英,石国亮,崔辉梅.外源甜菜碱对盐胁迫下加工番茄生理特性的影响[J].北方园艺,2009(8):243-246.
Liu J Y,Shi G L,Cui H M. Influence of exogenous application of glycinebetaine on physiology characteristic of salt-stressed processing tomato plants [J]. Northern Horticulture,2009(8):243-246.

[5] Ashraf M,Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance [J]. Environmental & Experimental Botany,2007,59(2):206-216.

[6] Jitender G. Glycinebetaine and abiotic stress tolerance in plants [J]. Plant Signaling & Behavior,2011,6(11):1746-1751.

[7] 周泉澄,华 春,周 峰,等.外源甜菜碱对盐胁迫下盐角草和毕氏海蓬子萌发及幼苗生长的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):179-184.
Zhou Q C,Hua C,Zhou F,et al. Effects of exogenous GB on germination and seedlings of *Salicornia europaea* L. and *Salicornia bigelovii* Torr. under NaCl stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2009,27(6):179-184.

[8] 李善家,韩多红,王恩军,等.外源甜菜碱对盐胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗保护酶活性的影响[J].草业科学,2016,33(4):674-680.
Li S J,Han D H,Wang E J,et al. Effects of exogenous betaine on seed germination and antioxidase activities of *Lycium ruthenicum* seedlings under NaCl stress [J]. Pratacultural Science,2016,33(4):674-680.

[9] 马婷燕,李彦忠.外源甜菜碱对 NaCl 胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗抗性的影响[J].草业科学,2019,36(12):3100-3110.
Ma T Y,Li Y Z. Effects of exogenous betaine on alfalfa seed germination and seedling resistance under NaCl stress [J]. Pratacultural Science,2019,36(12):3100-3110.

[10] 钟国辉,王健林.外源甜菜碱对氯化钠胁迫下白菜叶片的保护效应[J].植物生理学通讯,1997(5):333-335.
Zhong G H,Wang J L. Protective effects of exogenous betaine on Chinese cabbage leaves under sodium chloride stress [J]. Plant Physiology Communications,1997(5):333-335.

[11] 呼 彧,刘建辉,王 平,等.外源甜菜碱对高温胁迫下菜豆幼苗的生理效应[J].北方园艺,2009(8):5-8.
Hu Y,Liu J H,Wang P,et al. Physiological effects of glycine betaine under high temperature stress of kidney bean seedlings [J]. Northern Horticulture,2009(8):5-8.

[12] 马秀娟,杨 洁,张 凯,等.盐胁迫对千屈菜和黄花鸢尾种子萌发的影响[J].北方园艺,2015(21):90-95.
Ma X J,Yang J,Zhang K,et al. Effect of salt stress on the seeds germination of *Lythrum salicaria* Linn and *Iris pseudacorus* Lridaceae [J]. Northern Horticulture,2015(21):90-95.

[13] 周万海,师尚礼,寇江涛.外源水杨酸对苜蓿幼苗盐胁迫的缓解效应[J].草业学报,2012,21(3):171-176.

Zhou W H, Shi S L, Kou J T. Exogenous salicylic acid on alleviating salt stress in alfalfa seedlings [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(3): 171-176.

[14] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.

Zhang Z L, Qu W J, Li X F. Experimental guidance of plant physiology [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.

[15] 李合生. 植物生理生化研究技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

Li H S. Research technology of plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[16] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

Gao J F. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[17] 祝连彩, 唐士金, 周 丽. 考马斯亮蓝 G250 法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探讨 [J]. *教育教学论坛*, 2020(23): 266-269.

Zhu L C, Tang S J, Zhou L. Teaching practice and methodology discussion on the determination of protein content by Kom- as bright blue G250 method [J]. *Education and Teaching Forum*, 2020(23): 266-269.

[18] Hussain M, Malik M A, Farooq M. Improving drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(3): 193-199.

[19] Rezaei M A, Jokar I, Ghorbanli M. Morpho-physiological improving effects of exogenous glycine betaine on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. PS under drought stress conditions [J]. *Journal of Plant Molecular Biology & Omics*, 2012, 5(2): 79-86.

[20] 张 艳, 彭 燕, 何小双. 甜菜碱浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发特性的影响 [J]. *中国草地学报*, 2014, 36(4): 31-37.

Zhang Y, Peng Y, He X S. Effect of soaking seeds with betaine on seed germination characteristics of white clover (*Trifolium repens* L.) under the simulated drought stress [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(4): 31-37.

[21] 肖 斌, 汪媛艳. 盐胁迫对罗布麻和大花白麻种子萌发的影响 [J]. *草业科学*, 2020, 37(2): 314-319.

Xiao B, Wang Y Y. Effects of salt stress on seed germination of *Apocynum venetum* and *Poacynum hendersonii* [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(2): 314-319.

[22] 范春丽, 曲金柱. 甜菜碱浸种对盐胁迫下石榴种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. *中国果树*, 2015(6): 31-37.

Fan C L, Qu J Z. Effects of betaine immersion on seed germination and seedling physiological characteristics of *Pomegranate* under salt stress [J]. *China Fruit Trees*, 2015(6): 31-37.

[23] 李新梅, 孙丙耀, 谈建中. 甜菜碱与植物抗逆性关系的研究进展 [J]. *农业科学研究*, 2006, 27(3): 66-70.

Li X M, Sun B Y, Tan J Z. Research progress on the relationship between betaine and plant stress resistance [J]. *Agricultural Research*, 2006, 27(3): 66-70.

[24] 孙焕荣, 李 静, 封晓辉, 等. 盐胁迫对荷兰菊、千屈菜及狼尾草生长的影响 [J]. *河北林业科技*, 2020(2): 13-16.

Sun H R, Li J, Feng X H, et al. Effects of salt stress on the growth of *Symphytotrichum novi-belgii*, *Lythrum salicaria* and *Pennisetum alopecuroides* [J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2020(2): 13-16.

[25] 丁能飞, 傅庆林, 刘 琛, 等. 盐胁迫对两个大白菜品种抗氧化酶活性及离子吸收的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2008, 20(5): 322-327.

Ding N F, Fu Q L, Liu C, et al. Effect of salt stress on the growth, antioxidant enzyme activities, and ion uptake of two Chinese cabbage cultivars [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(5): 322-327.

[26] 唐 露. 渗透胁迫下香蕉对外源甜菜碱的生理响应及甜菜碱合成信号通路的研究 [D]. 海口: 海南大学, 2019.

Tang L. Physiological response to exogenous betaine and studies on the signaling pathway of betaine synthesis in banana under osmotic stress [D]. Haikou: Hainan University, 2019.

[27] 陈锦芬, 顾开元, 贾雨豪, 等. 外源甜菜碱及水杨酸对锰胁迫下烟草生理特性的影响 [J]. *中国烟草学报*, 2021, 27(2): 79-86.

Chen J F, Gu K Y, Jia Y H, et al. Effects of exogenous betaine and salicylic acid on physiological characteristics of tobacco under manganese stress [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2021, 27(2): 79-86.

[28] 郑容妹, 郑郁善, 张 梅, 等. 盐分胁迫对沿海绿竹光合作用及叶绿素的影响 [J]. *竹子研究汇刊*, 2002, 21(4): 76-80.

Zheng R M, Zheng Y S, Zhang M, et al. Study on impact of photosynthesis and chlorophyll of *Dendrocalamopsis oldhami* grown in the coastal areas under salt stress [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2002, 21(4): 76-80.

[29] 杨晓云, 宋 涛, 刘 辉, 等. 外源甜菜碱对 NaCl 胁迫下玉米幼苗生长和叶绿素含量的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(5): 830-833, 875.

Yang X Y, Song T, Liu H, et al. Effects of exogenous glycine betaine on the growth and chlorophyll content of maize seedlings under NaCl stress [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(5): 830-833, 875.

[30] 王国霞, 卢 超, 赵 奇, 等. 外源甜菜碱对低温胁迫下油茶生理特性的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 78-84.

Wang G X, Lu C, Zhao Q, et al. Effects of exogenous glycine betaine on physiological characteristics of *Camellia oleifera* under low temperature stress [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 78-84.

[31] 张 涛. 干旱和盐胁迫对花椒幼苗生理生化特性的影响 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2019.

Zhang T. Effects of drought and salt stress on physiological and biochemical characteristics of *Sorbus mongolica* seedlings [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2019.