

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.019

引用格式:高泓瑞,于雅娜,方志红,等.外源硒对混合盐碱胁迫下紫花苜蓿萌发及苗期生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(8):2960—2970

GAO Hong-rui, YU Ya-na, FANG Zhi-hong, et al. The Effect of Exogenous Selenium on the Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa Seedlings under Mixed Salt Alkali Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8): 2960—2970

## 外源硒对混合盐碱胁迫下紫花苜蓿萌发 及苗期生理特性的影响

高泓瑞<sup>1,4</sup>, 于雅娜<sup>1,4</sup>, 方志红<sup>1,4\*</sup>, 陈鑫幸<sup>1,4</sup>, 夏方山<sup>1,4</sup>, 石永红<sup>2</sup>, 张运婷<sup>3</sup>, 张 婷<sup>3</sup>,  
侯东来<sup>3</sup>, 杨子森<sup>3</sup>, 佟莉蓉<sup>1,4\*</sup>

(1. 山西农业大学草业学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学动物科学学院, 山西 太谷 030801; 3. 山西省畜牧技术推广中心, 山西 太原 030000; 4. 草地生态保护与乡土草种质资源创新山西省重点实验室, 山西 太谷 030801)

**摘要:**为研究外源硒在调控植物耐盐碱方面的作用,以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)‘WL298HQ’为试验材料,通过紫花苜蓿种子萌发和苗期施加不同浓度外源硒试验,探究外源硒对盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及苗期生理特性的影响,结果表明:施加 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的外源硒后,均对混合盐碱胁迫下的WL298HQ种子的萌发有明显的促进作用,当外源硒浓度为 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,外源硒对WL298HQ种子萌发有显著的促进作用。对WL298HQ苗期各项生理指标进行综合分析可知, $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的外源硒能够有效减轻混合盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗造成的生理损伤。混合盐碱胁迫显著抑制紫花苜蓿的抗氧化能力和增加细胞膜透性,但在混合盐碱胁迫下施加外源硒处理能够促进植株生长,减轻膜脂过氧化程度,并同步增强叶片中各种抗氧化酶活性。

**关键词:**紫花苜蓿;混合盐碱胁迫;外源硒;生理特性

中图分类号:S963.22+3.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2960-11

## The Effect of Exogenous Selenium on the Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa Seedlings under Mixed Salt Alkali Stress

GAO Hong-rui<sup>1,4</sup>, YU Ya-na<sup>1,4</sup>, FANG Zhi-hong<sup>1,4\*</sup>, CHEN Xin-xing<sup>1,4</sup>, XIA Fang-shan<sup>1,4</sup>,

SHI Yong-hong<sup>2</sup>, ZHANG Yun-ting<sup>3</sup>, ZHANG Ting<sup>3</sup>, HOU Dong-lai<sup>3</sup>, YANG Zi-sen<sup>3</sup>, TONG Li-rong<sup>1,4\*</sup>

(1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 2. College of Animal Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 3. Center of Animal Husbandry Technology extension Service on Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 4. Shanxi Key Laboratory of Grassland Ecological Protection and Native Grass Germplasm Innovation, Taigu, Shanxi Province 030801, China)

**Abstract:** To investigate the role of exogenous selenium in regulating plant tolerance to saline-alkali stress, alfalfa (*Medicago sativa* L.) ‘WL298HQ’ was used as experimental material. Different concentrations of exogenous selenium were applied during seed germination and seedling stages to explore the effects on seed germination and physiological characteristics under mixed saline-alkali stress. The results showed that applying exogenous selenium at concentrations of  $0.5$ ,  $1$ , and  $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  significantly promoted the germination of WL298HQ seeds under stress. The most pronounced promoting effect on seed germination was observed at  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . Comprehensive analysis of various physiological indicators at the seedling stage revealed that

收稿日期:2025-11-14;修回日期:2026-03-26

基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021222060);国家现代农业产业技术体系(CARS-34-37);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2022C011);山西省重点研发计划项目(201903D221091);山西农业大学科技创新提升工程(CXGC2023023)资助

作者简介:高泓瑞(2000-),女,汉族,山西太原人,硕士研究生,主要从事牧草抗逆性方向研究, E-mail: xiaogao001219@163.com;

\*通信作者 Author for correspondence, E-mail: fangzhihong2007@126.com; tlr122500@126.com

2 mmol·L<sup>-1</sup> exogenous selenium effectively alleviated the physiological damage caused by mixed saline-alkali stress to alfalfa seedlings. Mixed saline-alkali stress significantly inhibited the antioxidant capacity and increased cell membrane permeability of alfalfa. However, exogenous selenium application under mixed saline-alkali stress promoted plant growth, reduced the degree of membrane lipid peroxidation, and simultaneously enhanced the activities of various antioxidant enzymes in the leaves.

**Key words:** Alfalfa; Mixed saline-alkali stress; Exogenous selenium; Physiological characteristics

土壤盐碱化已成为当前全球生态环境中一个不容忽视的严峻问题,它影响着全球约11.25亿公顷的土地,严重制约了作物的生长发育<sup>[1]</sup>。目前,全球超过20%的耕地受到盐渍化的影响,其中中国约有200万公顷,主要分布在华北平原、东北平原、西北内陆和沿海地区<sup>[2]</sup>。盐碱可导致叶绿体损伤和生长迟缓,严重影响中国农林复合经营的可持续性<sup>[3-4]</sup>。在盐碱环境下,Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>在土壤中的积累很难逆转,最终会导致植物光合作用降低、脱水和离子失衡<sup>[5]</sup>。紫花苜蓿作为兼具高产特性与优良品质的重要牧草,不仅具备较强的耐寒、耐旱及耐盐碱能力,再生潜能也十分突出,同时,其蛋白质含量丰富、适口性佳、适应性广,对生态循环农业有显著优势,素有“牧草之王”的美誉。种植紫花苜蓿能够改善土壤结构,减轻盐碱化,促进畜牧业的可持续发展<sup>[6]</sup>。因此,在盐碱地的改良与利用实践中,紫花苜蓿被视为优选豆科牧草品种<sup>[7]</sup>。

硒在土壤中的存在形态具有多样性,主要包括元素硒(Selenium)、硒化物(Selenide)、亚硒酸盐(Disodium selenite)和硒酸盐(Selenates)等<sup>[8]</sup>。作为一种有益的微量元素,硒在植物体内扮演着生理枢纽角色,其供给水平具有双重作用:适宜浓度可促进叶芽发育,而浓度不当则产生抑制效应<sup>[9]</sup>。因此,硒在精准调控植物生长发育与有效增强抗逆性方面发挥着关键作用。已有相关研究表明,对小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[10]</sup>、水稻(*Oryza sativa*)<sup>[11-12]</sup>、玉米(*Zea mays*)<sup>[13]</sup>、燕麦(*Avena sativa*)<sup>[14]</sup>等作物实施适宜的硒处理,不仅能促进其生长发育,还能提高作物自身的硒含量、产量及其品质,从而为人类提供丰富的优质富硒食物来源。外源硒处理通过增强植物的抗氧化能力以维持活性氧代谢平衡,是其发挥缓解作用的关键生理途径,这已在玉米<sup>[14]</sup>、花生(*Ara-chis hypogaea*)<sup>[15]</sup>、白术(*Atractylodes macrocephala*)<sup>[16]</sup>、黄精(*Polygonatum sibiricum*)<sup>[17]</sup>、葡萄(*Vitis vinifera*)<sup>[18]</sup>及青花菜(*Brassica oleracea*)<sup>[19]</sup>等多种植物中得到证实。但是,关于外源硒处理对紫花苜蓿在盐碱混合胁迫下萌发及苗期生长和生理特性的影响及其调控机制的研究较为匮乏。为

此,本试验探究了混合盐碱胁迫下添加不同浓度的外源硒对紫花苜蓿种子萌发及苗期生理特性产生的影响,以期系统揭示外源硒调控紫花苜蓿种子萌发及苗期耐盐碱性的生理机制,为在盐碱条件下科学种植紫花苜蓿提供理论和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点和试验材料

本试验于山西农业大学草业学院国家牧草种质资源圃实验室进行。以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)‘WL298HQ’为试验材料(种子购自北京正道种业有限公司)。盐碱胁迫以混合溶液的形式施加(氯化钠、硫酸钠、碳酸氢钠和碳酸钠)。硒源选用亚硒酸钠(Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>分析纯),购自成都华夏化学有限公司。

### 1.2 试验设计

**1.2.1 盐碱胁迫—外源硒对WL298HQ种子萌发参数的影响** 挑选无病虫害、形态整齐、健康的WL298HQ种子,以去离子水处理的种子为对照,用10%次氯酸钠(NaClO)消毒15 min后用蒸馏水彻底冲洗3~5次,晾干。将晾干的种子再用不同浓度Se溶液(CK为去离子水)浸泡12 h,回干后将消毒的种子均匀摆放于内衬两层滤纸的培养皿中,每皿100粒种子,以混合盐碱溶液(NaCl: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: NaHCO<sub>3</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的摩尔比为1:9:9:1)为培养液,将配制好的浓度为120 mmol·L<sup>-1</sup>的盐碱混合溶液(前期试验筛选)倒入培养皿中,每个培养皿定量加入6 mL处理液(此时滤纸完全浸润),置于控温为25℃、控光周期为16 h/8 h条件下的光照培养箱中开展萌发试验,每个处理设置4次重复。为了保持适当的溶液浓度,每天通过称重和添加所需体积来补充蒸发损失的水分。每天记录萌发计数,当10 d内连续三天没有新种子萌发时,该过程被认为完成<sup>[20]</sup>。各处理液的具体组成见表1。

**1.2.2 盐碱胁迫—外源硒对WL298HQ苗期生理响应的调节作用** 本试验采用基质土盆栽的方式,

表1 种子萌发处理液浓度

Table 1 Concentration of seed germination treatment solution

| 处理液<br>Treatment solution                                 | 处理组<br>Treatment group |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| 蒸馏水                                                       | CK                     |
| 0.5 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | T1                     |
| 1.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | T2                     |
| 2.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | T3                     |
| 4.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | T4                     |
| 8.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | T5                     |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱                             | CK1                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+0.5 mmol·L <sup>-1</sup> Se | T7                     |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+1.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | T8                     |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+2.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | T9                     |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+4.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | T10                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+8.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | T11                    |

栽培容器为口径与高度均为18 cm的方形盆体。将草炭土,珍珠岩,蛭石按照3:1:1的比例混合成基质,每盆装定量基质640 g。将‘WL298HQ’种子均匀点播于装有基质的盆中,随后将所有盆栽转移至人工气候培养室进行统一培养。当株高大约为10 cm时(约20 d),选择长势一致的幼苗盆栽进行混合盐碱胁迫处理,同时进行硒处理,硒源选用Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>(分析纯)制备溶液。试验共进行胁迫+缓解处理3次,处理前测定土壤含水量为75%,每隔3 d进行一次处理,统一于傍晚进行浇灌胁迫,每次灌溉量为每盆400 mL。胁迫+缓解完成后进行各项指标的测定。各处理组如表2所示。

表2 苗期处理液浓度

Table 2 Concentration of treatment solution during the seedling stage

| 处理液<br>Treatment solution                                 | 处理组<br>Treatment group |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| 蒸馏水                                                       | CK                     |
| 0.5 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | S1                     |
| 1.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | S2                     |
| 2.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | S3                     |
| 4.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | S4                     |
| 8.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se(单独硒处理)                        | S5                     |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱                             | N                      |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+0.5 mmol·L <sup>-1</sup> Se | NS1                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+1.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | NS2                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+2.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | NS3                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+4.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | NS4                    |
| 120 mmol·L <sup>-1</sup> 混合盐碱+8.0 mmol·L <sup>-1</sup> Se | NS5                    |

注:由于外源硒浓度为8.0 mmol·L<sup>-1</sup>时,苗子全部死亡,故不进行数据分析

Note: Since all seedlings died at an exogenous selenium concentration of 8.0 mmol·L<sup>-1</sup>, this group was excluded from data analysis

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 萌发指标测定** ‘WL298HQ’种子的萌发情况依据《国际种子检验规程》<sup>[21]</sup>进行观测,逐日记录各培养皿中的正常发芽种子数。基于观测数据,计算种子各项萌发参数(包括发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数),并测定胚根长与胚芽长。

**1.3.2 苗期生理指标测定** 光合指标测定:气体交换参数测定,包括净光合速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度以及蒸腾速率(采用GF-3100便携式光合作用仪进行测量)。

叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量采用Arnon<sup>[22]</sup>描述的方法进行测定:

膜脂过氧化测定:相对电导率(Relative conductivity, REC)用电导率仪测定并依据公式 $L=S1/S2 \times 100\%$ 计算。通过丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量分析来评估胁迫条件下植物中的氧化活性,为了观察细胞膜的损伤,使用MDA来评估脂质过氧化,采用硫代巴比妥酸法进行测定<sup>[23]</sup>。

氧化活性测定:胁迫处理后收获‘WL298HQ’植株叶片,立即于液氮中冷冻并储存在-80℃下,用于测定酶促抗氧化系统指标,包括超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)<sup>[24]</sup>、过氧化物酶(Peroxidase, POD)<sup>[25]</sup>、过氧化氢酶(Catalase, CAT)<sup>[26]</sup>、谷胱甘肽还原酶(Glutathione reductase, GR)<sup>[27]</sup>。

### 1.4 统计分析

数据统计整理和计算使用Microsoft Excel 2016,绘图由Origin 2022完成,利用SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA)和主成分分析,并通过Duncan法进行多重比较,以鉴定统计学显著性变化,结果表示为平均值±标准误(SE)。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’种子萌发的调节作用

由表3可知,与CK相比,混合盐碱胁迫和单独施加外源硒以及混合盐碱-外源硒对种子的萌发产生了一定的影响。单独进行外源硒处理时,在0.5~4 mmol·L<sup>-1</sup>硒浓度的处理下,GP,GE,GI和VI基本呈先升高后降低的趋势;当外源硒浓度达到8 mmol·L<sup>-1</sup>时,发芽率等关键指标均呈现显著抑制效应( $P<0.05$ )。与单独混合盐碱胁迫相比,施加

0.5 mmol·L<sup>-1</sup>、1 mmol·L<sup>-1</sup>和 2 mmol·L<sup>-1</sup>的外源硒后,混合盐碱胁迫下的‘WL298HQ’种子的发芽率无显著差异,但在 4 mmol·L<sup>-1</sup>和 8 mmol·L<sup>-1</sup>外源硒处理下,‘WL298HQ’种子的发芽率差异性显著( $P<0.05$ )。

单一外源硒处理下,‘WL298HQ’种子的发芽

指数呈剂量依赖性变化,随浓度的提升显著升高后降低,当外源硒浓度为 T2(1 mmol·L<sup>-1</sup>)时的发芽指数最高,为 94.40。在混合盐碱胁迫下,外源硒浓度梯度处理同样诱导活力指数呈先增后降的响应模式,当外源硒浓度为 T7(0.5 mmol·L<sup>-1</sup>)时活力指数最高。

表 3 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’种子萌发的影响

Table 3 Effect of salt-alkali stress and exogenous selenium on the seed germination of ‘WL298HQ’

| 处理组<br>Treatment | 发芽率<br>Germination percentage (GP) / % | 发芽势<br>Germination energy (GE) / % | 发芽指数<br>Germination index (GI) | 活力指数<br>Vigor index (VI) |
|------------------|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| CK               | 85.25±1.11 <sup>b</sup>                | 84.50±1.19 <sup>b</sup>            | 81.97±1.11 <sup>c</sup>        | 33.09±1.15 <sup>b</sup>  |
| T1               | 94.00±1.78 <sup>a</sup>                | 93.25±1.93 <sup>a</sup>            | 91.45±2.14 <sup>ab</sup>       | 44.84±4.18 <sup>a</sup>  |
| T2               | 97.00±0.58 <sup>a</sup>                | 96.75±0.75 <sup>a</sup>            | 94.40±0.64 <sup>a</sup>        | 50.56±4.11 <sup>a</sup>  |
| T3               | 92.25±1.70 <sup>a</sup>                | 92.25±1.70 <sup>a</sup>            | 88.46±0.88 <sup>b</sup>        | 29.30±1.93 <sup>b</sup>  |
| T4               | 94.25±1.80 <sup>a</sup>                | 94.00±1.96 <sup>a</sup>            | 82.90±1.43 <sup>c</sup>        | 13.06±1.39 <sup>c</sup>  |
| T5               | 53.25±1.55 <sup>c</sup>                | 53.25±1.55 <sup>c</sup>            | 34.27±1.62 <sup>d</sup>        | 0.00±0.00                |
| CK1              | 43.50±2.00 <sup>d</sup>                | 42.75±1.89 <sup>d</sup>            | 16.18±1.95 <sup>ef</sup>       | 0.66±0.06 <sup>d</sup>   |
| T7               | 48.00±1.22 <sup>cd</sup>               | 47.75±1.03 <sup>cd</sup>           | 19.10±0.58 <sup>e</sup>        | 1.03±0.41 <sup>d</sup>   |
| T8               | 45.50±2.33 <sup>d</sup>                | 44.50±1.66 <sup>d</sup>            | 16.92±0.90 <sup>ef</sup>       | 0.70±0.06 <sup>d</sup>   |
| T9               | 49.75±1.44 <sup>cd</sup>               | 43.50±2.25 <sup>d</sup>            | 14.96±1.07 <sup>f</sup>        | 0.00±0.00                |
| T10              | 20.25±2.14 <sup>e</sup>                | 20.25±2.14 <sup>e</sup>            | 6.81±0.72 <sup>g</sup>         | 0.00±0.00                |
| T11              | 8.00±2.31 <sup>f</sup>                 | 19.75±2.10 <sup>e</sup>            | 5.50±0.37 <sup>g</sup>         | 0.00±0.00                |

注:同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ )

2.2 盐碱胁迫-外源硒对紫花苜蓿‘WL298HQ’苗期生理生化指标的影响

2.2.1 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’叶片叶绿素含量的剂量效应 如图 1 所示,单一外源硒处理下,叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量呈剂量依赖性变化,随浓度增加呈现先升高后降低的趋势,其中 S2 处理(1 mmol·L<sup>-1</sup>)下的叶绿素含量最高,且与 CK 无显著差异,说明没有混合盐碱胁迫时施加外源硒对叶绿素的合成无显著影响。

紫花苜蓿‘WL298HQ’经过 120 mmol·L<sup>-1</sup>的混合盐碱胁迫处理后,叶绿素含量较 CK 呈下降趋势,且施加不同浓度的外源硒处理后,导致叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量显著升高。混合盐碱胁迫下,幼苗经过施加不同浓度的外源硒处理后,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别比单独混合盐碱胁迫处理(N 胁迫处理)均有不同程度的提高,当添加的外源硒浓度为 NS3 处理时,叶绿素各组分含量呈现提升态势,其中叶绿素 a、叶绿素 b 及其总量分别较 N 胁迫处理组增长 49.34%, 91.24% 和 59.48%,达到峰值。值得注意的是,当外源硒浓度提升至 4 mmol·L<sup>-1</sup>(NS4 处理组)时,各项叶绿素指

标与单一混合盐碱胁迫处理组间未呈现统计学差异,这反映出高浓度外源硒对混合盐碱胁迫下的叶绿素生物合成未能展现出显著改善效果。因此,硒元素的缓解效应存在明显的浓度阈值,超出 NS3 浓度后其积极作用呈现递减趋势。

2.2.2 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’叶片气体交换动态的影响 由图 2 可以看出,单独施加不同浓度的外源硒,‘WL298HQ’的 Pn、Tr 和 Gs 相较于 CK 基本呈现逐渐下降的趋势,Ci 呈升后降的趋势。混合盐碱胁迫下,施加不同浓度的外源硒后,随着浓度的增加,NS1 和 NS2 净光合速率显著高于 N 胁迫处理( $P<0.05$ ),增幅分别为 61.93% 和 92.11%,NS2 净光合速率最高,达 12.33 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>。这说明外源硒对光合作用的促进作用具有浓度依赖性,NS1 和 NS2 处理的外源硒浓度对缓解混合盐碱胁迫的影响最为有利。NS1~NS4 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与 N 胁迫处理对比差异不显著。而 NS1 处理下蒸腾速率和气孔导度相较于 N 胁迫处理分别高出 106.09% 和 51.54%。这表明外源硒通过调节气孔功能来调节混合盐碱胁迫下‘WL298HQ’的光合作用。

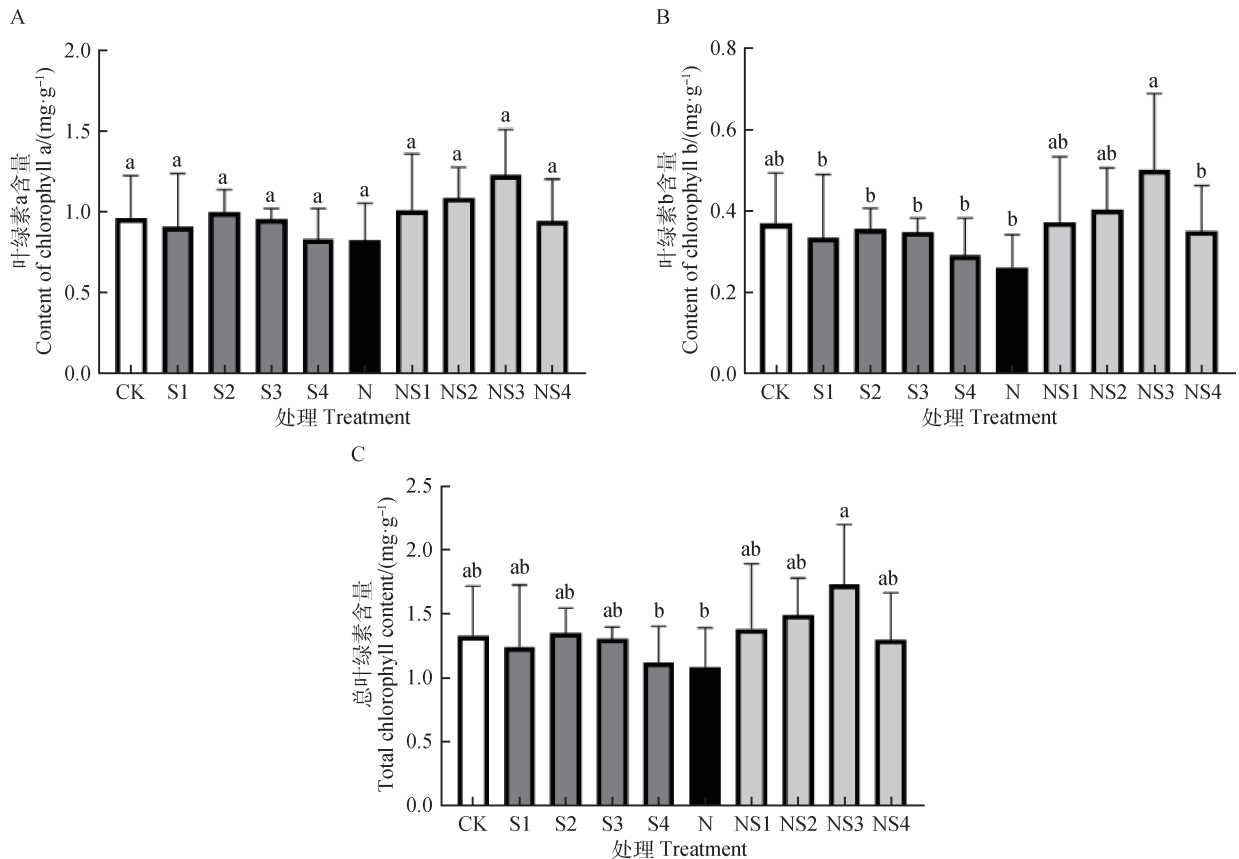


图1 外源硒对混合盐碱胁迫下‘WL298HQ’叶片(A)叶绿素含量a,(B)叶绿素含量b,(C)总叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of exogenous selenium on (A) chlorophyll a content, (B) chlorophyll b content, and (C) total chlorophyll content in WL298HQ leaves under mixed saline-alkali stress

注:CK为蒸馏水处理;S1为0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S2为1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S3为2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S4为4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;N为120 mmol·L<sup>-1</sup>混合盐碱;NS1为120 mmol·L<sup>-1</sup>混合盐碱+0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS2为120 mmol·L<sup>-1</sup>混合盐碱+1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS3为120 mmol·L<sup>-1</sup>混合盐碱+2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS4为120 mmol·L<sup>-1</sup>混合盐碱+4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se。小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: CK is distilled water treatment; S1 is 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S2 is 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S3 is 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S4 is 4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; N is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress; NS1 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS2 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS3 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS4 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se. Different lowercase letters indicate statistically significant differences ( $P < 0.05$ )

**2.2.3 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’叶片膜脂过氧化的影响** 图3显示,单独施加不同浓度的外源硒后,S1~S4处理对‘WL298HQ’叶片的REC和MDA含量有不同程度的影响,且均在S2处理时最低,但依然高于CK,分别上升了39.52%和8.56%。混合盐碱胁迫下,‘WL298HQ’叶片膜脂过氧化随着不同浓度外源硒的添加均有不同程度的变化,且均在NS3处理时下降的幅度最大,分别为23.98%和30.41%。

**2.2.4 盐碱胁迫-外源硒对‘WL298HQ’叶片抗氧化酶活性的影响** 图4显示了单独施加不同浓度的外源硒和混合盐碱胁迫下施加不同浓度外源硒对‘WL298HQ’叶片抗氧化酶活性的影响。相较于CK,单独施加不同浓度的外源硒后,‘WL298HQ’叶片POD、SOD和GR活性整体上呈先升高后降低

的趋势,且在S4处理时达到最低值,分别比CK降低了10.71%,13.99%,58.88%。

与N胁迫处理相比,在混合盐碱胁迫下,随着不同浓度外源硒的添加,WL298HQ叶片CAT、POD和SOD活性整体上呈现先升高后降低的变化规律,NS1~NS3处理后的CAT,POD,SOD活性有显著性差异,且都在NS3(硒浓度为2 mmol·L<sup>-1</sup>)时达到峰值,CAT、POD、SOD活性分别上升了45.06%,26.92%,10.10%。而GR活性,仅在NS3时相较N胁迫处理呈上升趋势,增幅为9.79%。因此,外源硒应用会积极影响植物的抗氧化防御机制,尤其是在最佳浓度下,可以增强混合盐碱胁迫下WL298HQ叶片中抗氧化酶的活性,帮助其在混合盐碱胁迫下应对氧化应激的能力。

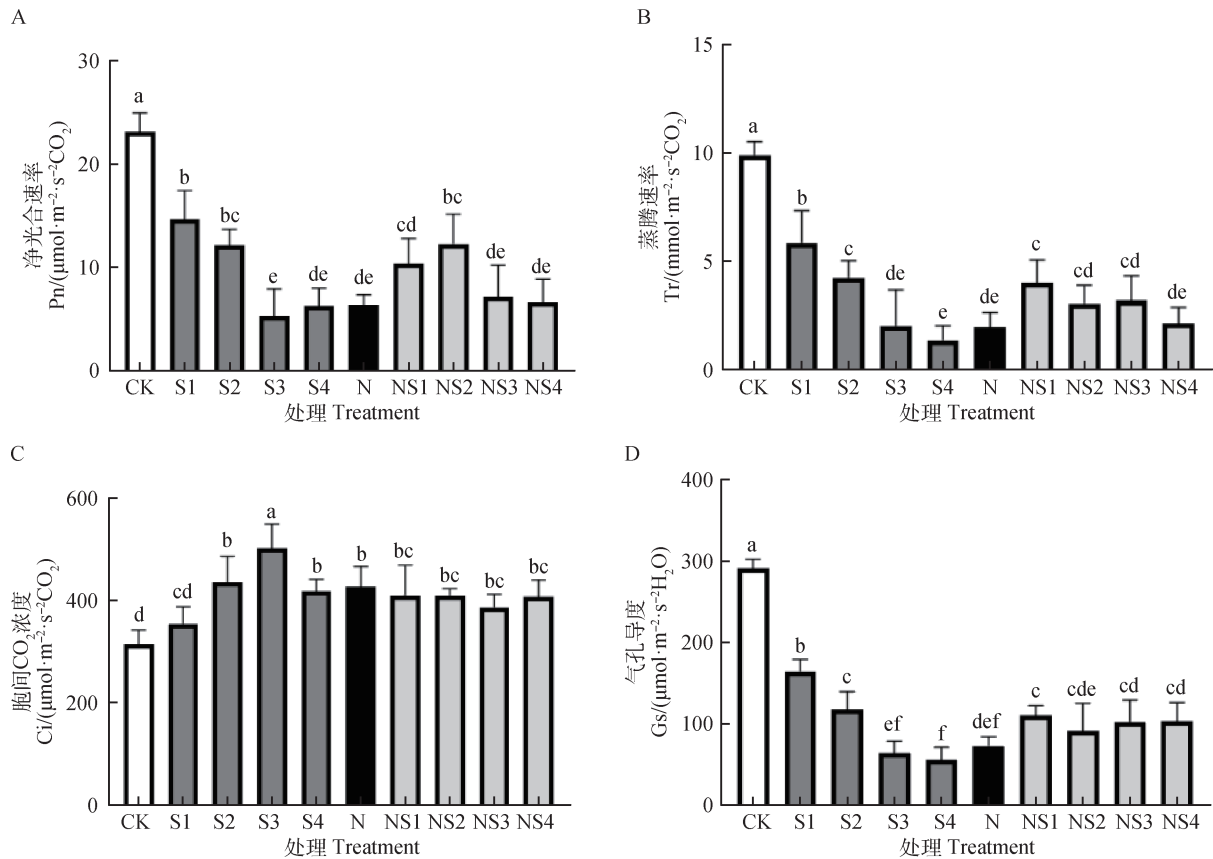


图2 外源硒对混合盐碱胁迫下WL298HQ叶片(A)净光合速率,(B)蒸腾速率,(C)胞间CO<sub>2</sub>,(D)气孔导度的影响

Fig. 2 Effects of exogenous selenium on (A) net photosynthetic rate, (B) transpiration rate, (C) intercellular CO<sub>2</sub> concentration, and (D) stomatal conductance in WL298HQ leaves under mixed saline-alkali stress

注:CK为蒸馏水处理;S1为0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S2为1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S3为2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;S4为4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;N为120 mmol·L<sup>-1</sup> 混合盐碱;NS1为120 mmol·L<sup>-1</sup> 混合盐碱+0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS2为120 mmol·L<sup>-1</sup> 混合盐碱+1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS3为120 mmol·L<sup>-1</sup> 混合盐碱+2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se;NS4为120 mmol·L<sup>-1</sup> 混合盐碱+4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se。小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: CK is distilled water treatment; S1 is 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S2 is 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S3 is 2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; S4 is 4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; N is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress; NS1 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+0.5 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS2 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+1.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS3 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+2.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se; NS4 is 120 mmol·L<sup>-1</sup> mixed salt-alkali stress+4.0 mmol·L<sup>-1</sup> Se. Different lowercase letters indicate statistically significant differences ( $P < 0.05$ )

### 2.3 盐碱胁迫-外源硒下‘WL298HQ’生理生化参数的主成分分析及综合评价

采用主成分分析法和隶属函数分析法评价外源硒对缓和盐碱胁迫的缓解效果(表4、表5)。利用SPSS软件对各个指标的原始数据进行标准化处理,然后采用主成分分析(PCA)对各指标进行降维和数据简化<sup>[28-29]</sup>,提取出3个主成分,同时获得因子载荷和贡献率(表4)。PCA结果表明,PC1对总方差的贡献率为47.51%,具有最高因子载荷为丙二醛(0.968),说明MDA是在应激条件下与细胞膜稳定性潜在相关的标记物。PC2对总方差的贡献率为28.41%,具有最高因子载荷为气孔导度(0.978),

这表明它通过气孔功能来缓解植物盐碱胁迫。PC3对总方差的贡献率为11.81%,具有最高因子载荷为过氧化氢酶(0.843)。

基于隶属度分析数据整合各个主成分的贡献率,建立综合评价体系对各个处理进行了量化分析。隶属函数分析表明,综合评价值越高,代表该处理对混合盐碱胁迫下‘WL298HQ’苗期的缓解效果越显著。结果显示,缓解组NS1~NS3均能不同程度地缓解‘WL298HQ’苗期所受胁迫,且NS3处理组(硒浓度为2 mmol·L<sup>-1</sup>)的综合评价值最高,该结果证实此浓度是缓解混合盐碱胁迫的最佳硒浓度(表5)。

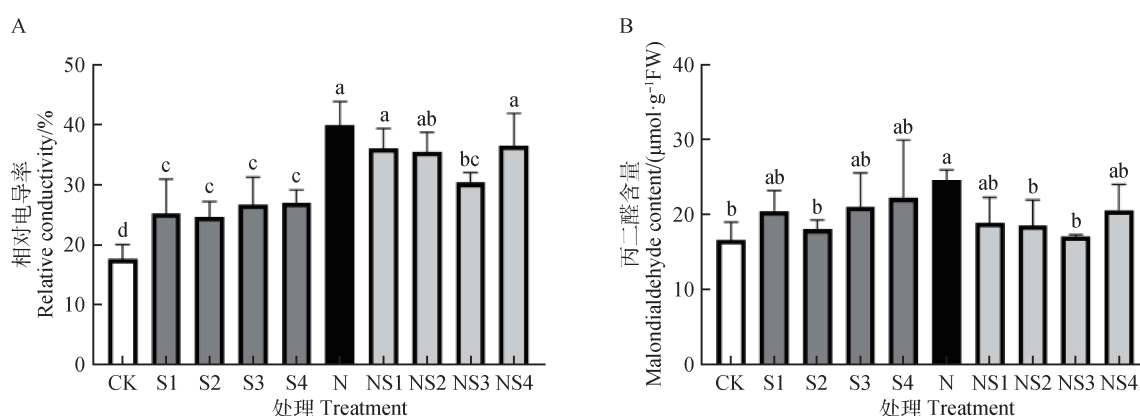


图3 外源硒对混合盐碱胁迫下‘WL298HQ’叶片(A)相对电导率,(B)丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effects of exogenous selenium on (A) relative electrical conductivity and (B) malondialdehyde content in WL298HQ leaves under mixed saline-alkali stress

注:CK为蒸馏水处理;S1为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;S2为 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;S3为 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;S4为 $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;N为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱;NS1为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;NS2为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱+ $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;NS3为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱+ $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se;NS4为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱+ $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se。小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: CK is distilled water treatment; S1 is  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S2 is  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S3 is  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S4 is  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; N is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress; NS1 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress+ $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS2 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress+ $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS3 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress+ $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS4 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress+ $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se. Different lowercase letters indicate statistically significant differences ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论

盐分胁迫通过扰乱植物及其种植系统的生理过程,对其造成有害影响,导致其生长、产量和整体质量大幅下降。长期处于高盐度环境,会对作物的水分吸收、养分平衡及代谢功能产生影响,同时削弱植物的抗逆性,从而减产。因此,在气候变化加剧的背景下,采取可持续的发展策略对于保持作物产量和品质至关重要<sup>[30]</sup>。外源微量元素的应用是改良植物耐盐性、减轻盐碱逆境伤害的可行性途径,硒元素因其在缓解多种生物与非生物胁迫中的调节效应,已成为环境友好型农业技术的重要研究方向。硒对植物生长的影响遵循必需微量元素的剂量效应规律,即适宜浓度可通过增强能量代谢促进植物生长,而超高浓度则会导致毒性积累<sup>[31]</sup>。在盐碱环境中,外源硒处理的小麦幼苗相较于未处理组表现出显著的生理优势,其缓解效果呈现浓度梯度差异特征<sup>[32]</sup>。本试验中,混合盐碱胁迫对‘WL298HQ’种子萌发及苗期生长造成损伤,影响了正常的生理代谢活动,而添加外源硒后,在适宜浓度范围内对‘WL298HQ’的萌发参数指标、苗期光合作用以及生理特性等方面起到一定的缓解作用,但施加过高浓度的硒会抑制其生长,这与王浩权等<sup>[32]</sup>的研究结果相似。

在种子萌发评价体系中,发芽率作为种子萌发动态的直观度量指标,直接反映种子群体的萌发完成进度,发芽势通过衡量初期集中发芽强度来评估种子内在生活力水平,活力指数则综合反映幼苗生长势与出苗均匀程度<sup>[33]</sup>。值得注意的是,发芽指数这一参数能够灵敏反映不同硒处理对种子萌发进程的累积影响<sup>[34]</sup>。本试验中,在混合盐碱胁迫下,随着外源硒浓度的增加,萌发关键指标均显著下降,说明高浓度的外源硒会引起植物的渗透胁迫和离子毒害( $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ),导致‘WL298HQ’种子发芽受损,扰乱生理和代谢过程,最终降低发芽能力。而适宜浓度的外源硒则能够有效促进‘WL298HQ’种子的萌发,揭示了“低促高抑”的调控特性。

光合作用涉及光依赖和不依赖反应,如气体交换、光捕获和碳固定<sup>[35]</sup>。陈海雁等<sup>[36]</sup>研究表明,外源物在盐胁迫条件下能够维持细胞的氧化还原平衡,进而减轻盐分对叶绿素合成的负面影响,且叶绿素是光合作用所必需的,而光合能力降低是植物在盐胁迫下生长抑制的主要原因。本试验条件下,‘WL298HQ’的叶绿素含量变化清晰地表征了胁迫与缓解效应:混合盐碱胁迫导致其显著降低,而施加 $0.5 \sim 2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的外源硒则呈现出浓度依赖性的恢复效应,表明适宜浓度的硒能有效拮抗胁迫所致的叶绿素降解。此外,Tholen等<sup>[37-38]</sup>研究结

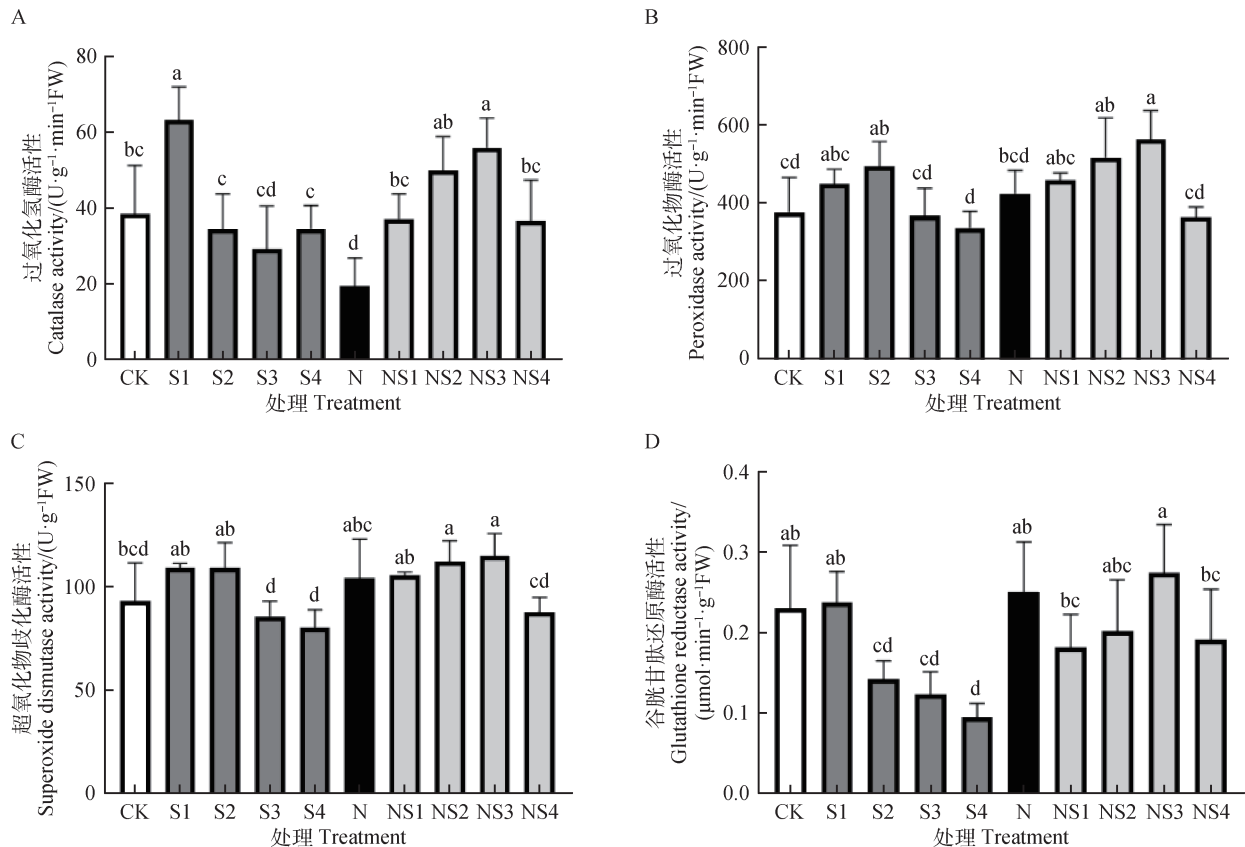


图 4 外源硒对混合盐碱胁迫下 WL298HQ 叶片 (A)CAT 活性, (B)POD 活性, (C)SOD 活性, (D)GR 活性的影响

Fig. 4 Effects of exogenous selenium on (A) CAT activity, (B) POD activity, (C) SOD activity, and (D) GR activity in WL298HQ leaves under mixed saline-alkali stress

注: CK 为蒸馏水处理; S1 为  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S2 为  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S3 为  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S4 为  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; N 为  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱; NS1 为  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱 +  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS2 为  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱 +  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS3 为  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱 +  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS4 为  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  混合盐碱 +  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se。小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: CK is distilled water treatment; S1 is  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S2 is  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S3 is  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; S4 is  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; N is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress; NS1 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress +  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS2 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress +  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS3 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress +  $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se; NS4 is  $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  mixed salt-alkali stress +  $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Se. Different lowercase letters indicate statistically significant differences ( $P < 0.05$ )

果证实,净光合速率的降低受到胞间  $\text{CO}_2$  浓度含量的限制。在光合作用过程中,  $\text{CO}_2$  的固定效率同时受到气孔限制与非气孔限制两类因素的协同调控,植物在受到胁迫时,会采取气孔关闭的适应性策略,以最小化蒸腾过程中的水分损失。本试验中,混合盐碱胁迫导致‘WL298HQ’在胞间  $\text{CO}_2$  浓度升高的同时净光合速率下降,验证其光合抑制主要由非气孔限制引起。由外源硒浓度为  $0.5 \sim 2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理后,‘WL298HQ’叶片的净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均显著高于混合盐碱胁迫处理的对照组,而其胞间  $\text{CO}_2$  浓度则显著低于对照组,这表明适量施用外源硒能有效改善气孔功能,有助于提升植物在盐碱胁迫条件下的光合作用能力。

植物在激活逆境响应网络时,会触发活性氧

(ROS)代谢通量激增,导致胞内氧化还原稳态失衡,这种氧化应激若未获及时调控,将引发氧化损伤。为维持氧化还原平衡,植物形成了双轨制防御机制:其一是基于超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽还原酶等关键酶的级联反应系统;其二是依赖抗坏血酸-谷胱甘肽循环的非酶促淬灭途径<sup>[39]</sup>。郭坤元等<sup>[17]</sup>对黄精的研究发现,低浓度亚硒酸钠溶液处理可以提高黄精幼苗 SOD 和 CAT 的含量。本试验中,对混合盐碱胁迫下的 WL298HQ 施加不同浓度的外源硒发现,当外源硒浓度为  $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,混合盐碱胁迫下‘WL298HQ’叶片组织中的抗氧化酶(SOD、POD、CAT 和 GR)酶活性均呈现显著提升,分别上升了 26.92%, 10.10%, 45.06% 和 9.79%,说明其提升了‘WL298HQ’的氧

表 4 主成分分析及贡献率  
Table 4 Principal component analysis and contribution rates

| 指标<br>Index                                                       | 主成分 1<br>Principal component 1 | 主成分 2<br>Principal component 2 | 主成分 3<br>Principal component 3 |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 净光合速率 Net photosynthetic rate                                     | 0.074                          | 0.951                          | 0.092                          |
| 蒸腾速率 Transpiration rate                                           | 0.104                          | 0.972                          | 0.076                          |
| 胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration | −0.047                         | −0.832                         | −0.377                         |
| 气孔导度 Stomatal conductance                                         | 0.052                          | 0.978                          | 0.064                          |
| 叶绿素 a Chlorophyll a                                               | 0.569                          | 0.331                          | 0.328                          |
| 叶绿素 b Chlorophyll b                                               | 0.673                          | −0.091                         | 0.625                          |
| 总叶绿素 Total chlorophyll                                            | 0.481                          | 0.030                          | 0.783                          |
| 过氧化氢酶 Catalase                                                    | 0.170                          | 0.304                          | 0.843                          |
| 过氧化物酶 Peroxidase                                                  | −0.155                         | −0.722                         | 0.511                          |
| 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase                                      | −0.809                         | −0.537                         | 0.061                          |
| 谷胱甘肽还原 Gglutathione reductase                                     | 0.966                          | −0.02                          | 0.207                          |
| 相对电导率 Relative conductivity                                       | 0.961                          | 0.082                          | 0.147                          |
| 丙二醛 Malondialdehyde                                               | 0.968                          | 0.016                          | 0.187                          |
| 贡献率 Contribution/%                                                | 47.510                         | 28.405                         | 11.813                         |
| 累计贡献率 Cumulative contribution/%                                   | 34.837                         | 69.668                         | 87.727                         |

表 5 各处理综合指标、权重、隶属函数值、D 值及综合评价  
Table 5 Comprehensive indicators, weights, membership function values, D values, and comprehensive evaluations for each treatment

| 处理<br>Treatment | $X_i$ |       |       | $\mu(X_i)$ |       |       | D 值<br>D value | 综合评价<br>Comprehensive evaluation |
|-----------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|----------------|----------------------------------|
| CK              | 1.15  | −2.22 | −0.28 | 0.88       | 0     | 0.33  | 0.52           | 6                                |
| S1              | 0.56  | −0.72 | 1.07  | 0.68       | 0.40  | 0.71  | 0.59           | 3                                |
| S2              | 0.20  | 0.08  | −0.62 | 0.55       | 0.62  | 0.24  | 0.53           | 5                                |
| S3              | −1.00 | 0.27  | −1.47 | 0.14       | 0.67  | 0     | 0.29           | 9                                |
| S4              | −1.38 | −0.46 | −0.82 | 0          | 0.47  | 0.18  | 0.18           | 10                               |
| N               | −1.21 | 0.18  | 2.11  | 0.06       | 0.64  | 1     | 0.38           | 8                                |
| NS1             | 0.14  | 0.38  | 0.12  | 0.53       | 0.70  | 0.45  | 0.57           | 4                                |
| NS2             | 0.63  | 0.88  | 0.17  | 0.70       | 0.83  | 0.46  | 0.71           | 2                                |
| NS3             | 1.49  | 1.51  | −0.24 | 1          | 1     | 0.35  | 0.91           | 1                                |
| NS4             | −0.58 | 0.11  | −0.04 | 0.28       | 0.62  | 0.40  | 0.41           | 7                                |
| 权重 Weight       |       |       |       | 0.542      | 0.324 | 0.135 |                |                                  |

化还原能力,有效提升了‘WL298HQ’对活性氧(ROS)的清除效率,进而强化了植物整体的耐盐碱性,说明硒可以通过刺激酶促抗氧化系统(如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等)和非酶抗氧化系统(如抗坏血酸、谷胱甘肽和酚类化合物)的合成,增强植物抵御氧化应激的能力。

植物在遭受逆境胁迫时,当活性氧(ROS)的生成速率超出抗氧化系统的稳态阈值,将触发膜脂过氧化连锁反应,促使丙二醛(MDA)等有害代谢产物积累,MDA 和 REC 是评估植物耐盐碱性和氧化应激水平的关键生理指标,其含量水平与细胞膜结构的完整性呈负相关关系,可用于定量评估植物质膜完整性破坏程度的指标<sup>[40]</sup>。此发现与刘沂欣等<sup>[41]</sup>关于外源褪黑素降低 MDA 和 REC 以减轻膜损伤

的结论相呼应,MDA 和 REC 作为评估质膜完整性与氧化应激水平的核心指标,其含量水平直接标志着植物在胁迫下膜脂过氧化的程度与细胞膜受损的状况。本试验中,‘WL298HQ’受到混合盐碱胁迫后,MDA 含量和 REC 对比 CK 显著上升,而外源硒处理组的 MDA 含量和相对电导率均较混合盐碱胁迫组明显下降,证实外源硒可通过清除 ROS 来抑制膜质过氧化,最终起到稳定细胞膜结构的作用。

4 结论

本试验以紫花苜蓿‘WL298HQ’为材料,研究了不同浓度的外源硒对 120 mmol·L<sup>−1</sup>混合盐碱胁迫下紫花苜蓿种子萌发和苗期生长的影响,发现在混

合盐碱胁迫下‘WL298HQ’的种子萌发以及苗期各项生理指标均受到不同程度的影响;施加 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硒是解除混合盐碱胁迫对种子萌发抑制的关键浓度;施加 $0.5\sim 2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硒均能在一定程度上缓解混合盐碱胁迫对‘WL298HQ’苗期生长的毒害作用。混合盐碱胁迫下,施加 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源硒的‘WL298HQ’表现出较强的抗氧化能力,SOD,POD,CAT和GR等酶活性增加,有利于降低混合盐碱胁迫产生的活性氧(ROS),从而维持光合系统的稳定性,保障盐碱环境下植物的最佳气体交换。因此,适当剂量的外源硒能显著提高混合盐碱胁迫下WL298HQ苗期的生理响应和适应性。

## 参考文献

- [1] WANG C F, HAN G L, YANG Z R, et al. Plant salinity sensors: current understanding and future directions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 859224
- [2] LI H, LIN J, YANG Q S, et al. Comprehensive analysis of differentially expressed genes under salt stress in pear (*Pyrus betulaefolia*) using RNA-Seq[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, 82(3): 409-420
- [3] ZHAO G M, SHI Q M, HAN Y, et al. The physiological and biochemical responses of a medicinal plant (*Salvia miltiorrhiza* L.) to stress caused by various concentrations of NaCl[J]. *Plos One*, 2014, 9(2): e89624
- [4] WANG X M, CHEN Z T, SUI N. Sensitivity and responses of chloroplasts to salt stress in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1374086
- [5] LI X Y, XIE L N. Research progress in  $\text{Na}^+$  regulation mechanism of plants under salt stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(7): 148-155
- [6] SU K Q, MU L, ZHOU T, et al. Intercropped alfalfa and spring wheat reduces soil alkali-salinity in the arid area of north-western China[J]. *Plant and Soil*, 2024, 499(1): 275-292
- [7] 王晓春, 杨天辉, 王川, 等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿的生长和生理指标的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(19): 139-145  
WANG X C, YANG T H, WANG C, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on growth and physiology of alfalfa[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(19): 139-145
- [8] 马月花. 黄芪幼苗对硒、镉处理的响应以及硒缓解镉胁迫的机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019: 15-20  
MA Y H. Response of *Astragalus membranaceus* seedlings to treatments of selenium and cadmium and mechanism of selenium relieving cadmium stress[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019: 15-20
- [9] CITTRARASU V, KALIANNAN D, DHARMAN K, et al. Green synthesis of selenium nanoparticles mediated from *Ceropegia bulbosa* Roxb extract and its cytotoxicity, antimicrobial, mosquitocidal and photocatalytic activities[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 1032
- [10] WANG M, ALI F, WANG M K, et al. Understanding boosting selenium accumulation in Wheat (*Triticum aestivum* L.) following foliar selenium application at different stages, forms, and doses[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(1): 717-728
- [11] 张玮雯, 董畅茹, 刘小强, 等. 硒对水稻吸收转运镉、砷和汞影响机制的研究进展[J]. *生物学杂志*, 2021, 38(5): 101-104, 109  
ZHANG Y W, DONG C R, LIU X Q, et al. Research on effects of selenium on the uptake and transfer of Cd, As and Hg in rice[J]. *Journal of Biology*, 2021, 38(5): 101-104, 109
- [12] ADHIKARY S, BISWAS B, CHAKRABORTY D, et al. Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 7103
- [13] WANG M, WANG Y X, GE C H, et al. Foliar selenium nanoparticles application promotes the growth of maize (*Zea mays* L.) seedlings by regulating carbon, nitrogen and oxidative stress metabolism [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311: 111816
- [14] HAO S N, LIU P F, QIN J, et al. Effects of applying different doses of selenite to soil and foliar at different growth stage on selenium content and yield of different oat varieties[J]. *Plants*, 2022, 11(14): 1810
- [15] 施和平, 张晓元, 许晟. 水培条件下硒对花生幼苗生长和开花及抗氧化酶活性的影响[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(12): 2489-2495  
SHI H P, ZHANG X Y, XU S. Effect of selenium on growth, flowering and activities of antioxidant enzymes of *Arachis hypogaea* seedlings under hydroponic conditions[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(12): 2489-2495
- [16] 王华, 张雅娟, 周武先, 等. 外源硒对白术种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(22): 7551-7558  
WANG H, ZHANG Y J, ZHOU W X, et al. The effects of exogenous selenium on seed germination and seedling physiological characteristics of *Atractylodes macrocephala* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(22): 7551-7558
- [17] 郭坤元, 吴育中, 杨春惠, 等. 外源硒对黄精种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(22): 7568-7576  
GUO K Y, WU Y Z, YANG C H, et al. The effects of exogenous selenium on seed germination and seedling physiological characteristics of *Polygonatum sibiricum* red [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(22): 7568-7576
- [18] 宁娜, 张惠敏, 安姝媛, 等. 外源硒对葡萄叶片活性氧代谢及果实贮藏品质的影响[J]. *北方园艺*, 2022(15): 89-97  
NING N, ZHANG H M, AN S P, et al. Effects of exogenous sodium selenite on leaf active oxygen metabolism and grape storage quality in *Vitis vinifera* L [J]. *Northern Horticulture*, 2022(15): 89-97
- [19] 成凯, 何茂, 黄志, 等. 硒、硫互作对青花菜幼苗渗透调节物质和抗氧化酶的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(1): 98-107

- CHENG K, HE M, HUANG Z, et al. Effect of interaction between selenium and sulfur on osmotic regulation and antioxidant enzymes of broccoli seedlings [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(1):98-107
- [20] CUI X W, GUO Z P, MAO Y, et al. Evaluation on salt tolerance of 33 alfalfa varieties during germination [J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2022, 43(2):55-65
- [21] 李小娥. Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发生理及幼苗抗氧化系统和Pb富集效应的影响[J]. *草地学报*, 2026, 34(5):1691-1700
- LI X E. Effects of Pb stress on seed germination physiology, seedling antioxidant system and Pb accumulation of alfalfa [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(5):1691-1700
- [22] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in beta vulgaris [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1):1-15
- [23] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1968, 125(1):189-198
- [24] SANYAL R P, PRASHAR V, JAWALI N, et al. Molecular and biochemical analysis of duplicated cytosolic CuZn superoxide dismutases of rice and in silico analysis in plants [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:864330
- [25] ZHAO Y, LI Y S, GAO X F. A new method for accurate determination of peroxidase activity based on fluorescence decrease of guaiacol [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2015, 43(7):1040-1046
- [26] YEMEL'YANOV V V, LASTOCHKIN V V, PRIKAZIUK E G, et al. Activities of catalase and peroxidase in wheat and rice plants under conditions of *Anoxia* and post-anoxic aeration [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2022, 69(6):117
- [27] KAUR Y, DAS N. Roles of polyamines in growth and development of the solanaceous crops under normal and stressful conditions [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(8):4989-5010
- [28] FILHO E G A, BRAGA L N, SILVA L M A, et al. Physiological changes for drought resistance in different species of *Phyllanthus* [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:15141
- [29] SIVAKUMAR J, PRASHANTH J E P, RAJESH N, et al. Principal component analysis approach for comprehensive screening of salt stress-tolerant tomato germplasm at the seedling stage [J]. *Journal of Biosciences*, 2020, 45(1):141
- [30] ANANNYA D, SAIKAT D, SOUJANYA J, et al. Efficacy of selenium in enhancing crop resilience against soil salinity in agroecosystems [M]. *Selenium in Sustainable Agriculture: A Soil to Spoon Prospective*, 2025:979-1005
- [31] 崔科飞, 代惠萍, 朱佳妮, 等. 硒胁迫对大叶紫花苜蓿生理特性的影响[J]. *作物杂志*, 2016(4):133-136
- CUI K F, DAI H P, ZHU J N, et al. Effects of selenium stress on the physiological characteristic of *Medicago sativa* L [J]. *Crops*, 2016(4):133-136
- [32] 王浩权, 杨东霞, 刘红恩, 等. 不同浓度外源硒对中等盐胁迫下小麦幼苗的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2024, 58(5):791-799
- WANG H Q, YANG D X, LIU H E, et al. Effects of different concentrations of exogenous selenium on wheat seedlings under moderate salt stress [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2024, 58(5):791-799
- [33] 韩建国. 牧草种子学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000:18-23
- HAN J G. *Forage Seed Science* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2000:18-23
- [34] 彭琪, 何红花, 范陈斌, 等. 硒对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2020, 39(6):1-8
- PENG Q, HE H H, FAN C B, et al. Effects of selenium on seed germination and seedling growth of alfalfa [J]. *Seed*, 2020, 39(6):1-8
- [35] TU F. How much solar energy can green plants convert in a year [J]. *The Plant Journal*, 1977, 6
- [36] 陈海雁, 黄荣, 赵亮, 等. Cp2-EPS对盐胁迫下紫花苜蓿苗期形态及光合特性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(1):229-238
- CHEN H Y, HUANG R, ZHAO L, et al. Effects of Cp2-EPS on the morphology and photosynthesis characteristics of alfalfa seedlings under salt stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1):229-238
- [37] THOLEN D, ZHU X G. The mechanistic basis of internal conductance: a theoretical analysis of mesophyll cell photosynthesis and CO<sub>2</sub> diffusion [J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(1):90-105
- [38] ENGINEER C B, HASHIMOTO-SUGIMOTO M, NEGI J, et al. CO<sub>2</sub> sensing and CO<sub>2</sub> regulation of stomatal conductance: advances and open questions [J]. *Trends in Plant Science*, 2016, 21(1):16-30
- [39] KESAWAT M S, SATHEESH N, KHERAWAT B S, et al. Regulation of reactive oxygen species during salt stress in plants and their crosstalk with other signaling molecules-current perspectives and future directions [J]. *Plants*, 2023, 12(4):864
- [40] 侯汶君, 麻冬梅, 张玲, 等. 叶面喷施表油菜素内酯对湖南稷子耐盐性的调控作用[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(4):517-528
- HOU W J, MA D M, ZHANG L, et al. Modulation of salt tolerance in *Echinochloa frumentacea* by foliar spraying of epibrassinolide [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(4):517-528
- [41] 刘沂欣, 隋晓青, 王鑫尧, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿的缓解作用[J]. *草业学报*, 2025, 34(9):206-214
- LIU Y X, SUI X Q, WANG X Y, et al. Mitigating effects of exogenous melatonin on alfalfa under salt stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(9):206-214

(责任编辑 彭露茜)