

# NaCl 胁迫对紫花苜蓿种子萌发, 幼苗生长及生理特性的影响

苗涵<sup>1</sup>, 王鲁北<sup>2</sup>, 王振南<sup>1</sup>, 李富宽<sup>1</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 杨燕<sup>3</sup>, 吕慎金<sup>1</sup>

(1. 临沂大学农林科学学院, 山东 临沂 276000; 2. 临沂市城市管理综合服务中心, 山东 临沂 276000; 3. 临沂市农业科学院, 山东 临沂 276012)

**摘要:**以紫花苜蓿种子为材料, 利用培养皿开展种子发芽试验, 研究不同浓度 NaCl 胁迫下种子的萌发及幼苗生长情况。结果表明: NaCl 胁迫显著抑制紫花苜蓿种子萌发及幼苗的生长, 对根的生长抑制性大于苗和全株; NaCl 胁迫下, 苜蓿幼苗体内保护性物质(超氧化歧化酶、脯氨酸和可溶性蛋白等)降低了丙二醛的水平。因此, 苜蓿可通过自身生理调节作用, 减轻 NaCl 胁迫对其的伤害。

**关键词:** NaCl 胁迫; 紫花苜蓿; 种子萌发; 幼苗生长; 生理特性

**中图分类号:** S542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2021)02-0100-06

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyyecp.2021.02.014

土壤盐渍化是我国面临的主要环境问题<sup>[1]</sup>。据统计, 我国盐土面积为 1 600 万  $\text{hm}^2$  (不包括滨海滩涂), 并呈不断扩大的趋势。因此, 改良利用盐碱地对于发展现代农业生产具有重要意义。紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是一种在世界上广泛种植的豆科牧草, 较耐盐碱, 是改良盐碱地的理想植物<sup>[2-3]</sup>。但当盐浓度过高时, 苜蓿种子的发芽率及幼苗的成活率受到严重抑制<sup>[4-5]</sup>, 严重阻碍了苜蓿草地的建植。目前, 已有研究报道了盐胁迫对苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响<sup>[5-8]</sup>, 所测发芽指标以及幼苗生理指标, 如发芽率、发芽势、脯氨酸含量、抗氧化酶活性等均能较好地揭示

种子萌发及幼苗生长在盐胁迫下的变化。如紫花苜蓿种子的发芽率随盐浓度的提高显著下降<sup>[5]</sup>; 盐胁迫下紫花苜蓿品种的相对发芽率和相对发芽势随着盐浓度的升高呈降低趋势<sup>[9]</sup>; 盐胁迫引起紫花苜蓿脯氨酸含量的增加<sup>[10]</sup>, 但随着盐浓度的增加, 其变化规律尚未进一步探索。另外, 植物的生长是一个连续的过程, 种子萌发对盐胁迫的响应会进一步影响幼苗的生长特性<sup>[11]</sup>。因此, 本研究分析了不同浓度 NaCl 处理下, 紫花苜蓿种子的萌发及幼苗的生长随盐浓度增加的变化, 并探讨了其间的偶联关系, 以进一步揭示紫花苜蓿对盐胁迫的响应机理。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

紫花苜蓿品种为阿尔冈金。种子由济南市天桥区澳荷畜牧良种销售中心提供。

### 1.2 试验方法

挑取饱满的种子, 采用 0.1%  $\text{KMnO}_4$  溶液消毒 20 min, 用清水冲洗干净。用蒸馏水浸种 12 h。采用直径为 10 cm 的培养皿, 培养皿中均匀铺放 2 层湿润滤纸, 每皿放入 100 粒种子。缓慢加入不同浓度 (0%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%、1.8%) 的 NaCl 溶液 4 mL, 0% 浓度为对照。将培养皿放置在人工气候箱中, 温度设置为 25℃, 光照/黑暗时间为 16 h/8 h, 培

收稿日期: 2020-02-29; 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 2018 年度山东省大学生科研项目 (18SSR064); 2018 年国家级大学生创新创业训练计划项目 (201810452052); 山东省现代农业产业技术体系牧草创新团队临沂综合试验站 (SDAIT-23-10); 山东省现代农业产业技术体系羊创新团队 (SDAIT-10-14)

作者简介: 苗涵 (1997-), 女, 山东龙口人, 学生。

E-mail: 767587746@qq.com

王振南为通讯作者。E-mail: wangzn11@163.com;

吕慎金为共同通讯作者。

E-mail: lvshenjin@lyu.edu.cn

养 7 d 后统计相关萌发指标,并在第 7 d 称取 0.5 g 全株(鲜重),测定相关生理指标。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 种子萌发相关指标 以胚根长度为种子长度的 2 倍,胚芽与种子等长作为种子萌发标准,每天统计发芽的种子数后计算发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。计算公式如下:

发芽率(Germination rate, GR, %) = (7 d 时正常发芽的种子数/100) × 100%

发芽势(Germination potential, GP, %) = (4 d 时正常发芽的种子数/100) × 100%

发芽指数(Germination index, GI) =  $\sum(Gt/Dt)$

活力指数(Vigor index, VI) = GI × 第 7 d 正常幼苗平均鲜重

式中,  $D_t$  为第  $t$  天,  $G_t$  为与  $D_t$  相应的发芽种子数。

于第 7 d 随机取 10 株苗,用直尺测量苗长度、根长度,以称重法称量苗鲜重、根鲜重。将称量完鲜重的苗与根于 65℃ 烘干 24 h,称量苗、根干重,计算全株鲜重和干重,进而计算苗、根和全株植物的绝对含水量。每个处理均设置 3 个重复。

全株鲜重(g) = 苗鲜重 + 根鲜重

全株干重(g) = 苗干重 + 根干重

苗(或根、全株)绝对含水量(%) =  $[1 - \text{苗(或根、全株)干重} / \text{苗(或根、全株)鲜重}] \times 100\%$

表 1 不同浓度 NaCl 处理下的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数

Table 1 Effects of different concentrations of NaCl on GR, GP, GI and VI in alfalfa

NaCl 浓度/%	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数
0	92 ± 4 <sup>a</sup>	90 ± 3 <sup>a</sup>	214 ± 18 <sup>a</sup>	2.08 ± 0.2 <sup>a</sup>
0.3	93 ± 3 <sup>a</sup>	88 ± 3 <sup>ab</sup>	181 ± 10 <sup>b</sup>	2.15 ± 0.5 <sup>a</sup>
0.6	91 ± 2 <sup>a</sup>	81 ± 6 <sup>b</sup>	129 ± 10 <sup>c</sup>	1.92 ± 0.2 <sup>ab</sup>
0.9	89 ± 4 <sup>a</sup>	69 ± 11 <sup>c</sup>	98 ± 13 <sup>d</sup>	1.66 ± 0.22 <sup>b</sup>
1.2	85 ± 5 <sup>a</sup>	59 ± 10 <sup>d</sup>	78 ± 5 <sup>e</sup>	1.29 ± 0.07 <sup>c</sup>
1.5	74 ± 10 <sup>b</sup>	38 ± 4 <sup>e</sup>	52 ± 6 <sup>f</sup>	0.71 ± 0.11 <sup>d</sup>
1.8	50 ± 13 <sup>c</sup>	16 ± 6 <sup>f</sup>	29 ± 7 <sup>g</sup>	0.3 ± 0.08 <sup>e</sup>

注:同列数值不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同

### 2.2 NaCl 胁迫对苗高、根长和全株长的影响

随着盐浓度的增加,紫花苜蓿苗高、根长和全株长先增加后降低。NaCl 浓度为 0.3% 时,苗高、根长和全株长显著增加 ( $P < 0.05$ ),高浓度 NaCl (1.5%, 1.8%) 胁迫显著降低了苗高、根长和全株长 ( $P < 0.05$ )。其他浓度间无显著变化 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。

1.3.2 生理指标测定 对全株进行生理指标测定。丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸氧化比色法测定<sup>[12]</sup>;可溶性糖(WSS)含量用蒽酮法测定<sup>[13]</sup>;脯氨酸(Proline)含量用磺基水杨酸法测定<sup>[14]</sup>;过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚法测定<sup>[15]</sup>;过氧化氢酶(CAT)活性用过氧化氢-碘量法测定<sup>[16]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性用氮蓝四唑光还原法测定<sup>[17]</sup>;可溶性蛋白(SP)含量用考马斯亮蓝法测定<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

各指标测定重复 3 次。采用 Excel 2003 进行数据录入及作图,SPSS 17.0 One-Way ANOVA 进行差异性统计分析,SPSS 17.0 构建相关性模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaCl 胁迫对发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数的影响

随着 NaCl 浓度的升高,紫花苜蓿种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均呈现降低趋势(表 1)。发芽率在高浓度(1.5% 和 1.8%) NaCl 胁迫下显著降低 ( $P < 0.05$ ),低浓度胁迫下不显著 ( $P > 0.05$ )。但 NaCl 胁迫均显著延缓了种子的发芽速度,并且随着 NaCl 浓度的增加,种子发芽势、发芽指数、活力指数均呈显著降低的趋势。说明 NaCl 胁迫对种子的萌发有抑制作用。

### 2.3 NaCl 胁迫对幼苗鲜重、干重及绝对含水量的影响

NaCl 胁迫对紫花苜蓿鲜重、干重及绝对含水量影响显著 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。随着 NaCl 浓度的增加,苗鲜重、全株鲜重、苗干重、全株干重呈先增加后降低的趋势,在 0.9% 浓度时达到最大值;但根鲜重呈显著降低的

趋势;根干重只在高浓度下(1.5%和1.8%)显著降低( $P<0.05$ );苗和全株绝对含水量呈先增加后降低的趋

势,1.2%浓度时达到最大值;但根绝对含水量呈降低趋势。NaCl胁迫显著降低了紫花苜蓿的根冠比( $P<0.05$ )。

表 2 不同浓度 NaCl 处理下的苗高、根长和全株长

Table 2 Effects of different concentrations of NaCl on the length of shoot, root and total plant

NaCl 浓度/%	苗高/cm	根长/cm	全株长/cm
0	0.437±0.15 <sup>ab</sup>	2.593±1.517 <sup>b</sup>	3.03±1.508 <sup>b</sup>
0.3	0.467±0.137 <sup>a</sup>	3.247±1.476 <sup>a</sup>	3.713±1.513 <sup>a</sup>
0.6	0.447±0.155 <sup>ab</sup>	2.403±1.372 <sup>b</sup>	2.85±1.344 <sup>b</sup>
0.9	0.507±0.151 <sup>a</sup>	2.087±1.14 <sup>b</sup>	2.593±1.206 <sup>b</sup>
1.2	0.383±0.144 <sup>bc</sup>	2.37±0.877 <sup>b</sup>	2.753±0.929 <sup>b</sup>
1.5	0.437±0.096 <sup>ab</sup>	1.343±0.57 <sup>c</sup>	1.78±0.577 <sup>c</sup>
1.8	0.33±0.099 <sup>c</sup>	1.127±0.388 <sup>c</sup>	1.457±0.399 <sup>c</sup>

表 3 不同浓度 NaCl 处理下的幼苗鲜重、干重、绝对含水量

Table 3 Effects of different concentrations of NaCl on fresh weight, dry weight and absolute water content

NaCl 浓度/%	鲜重/(g·千株 <sup>-1</sup> )			干重/(g·千株 <sup>-1</sup> )			绝对含水量/%			根冠比
	苗	根	全株	苗	根	全株	苗	根	全株	
0	8.133±0.665 <sup>c</sup>	1.597±0.384 <sup>a</sup>	9.73±1.049 <sup>d</sup>	1.49±0.095 <sup>cd</sup>	0.41±0.151 <sup>a</sup>	1.9±0.24 <sup>bc</sup>	82±1 <sup>d</sup>	74±10 <sup>a</sup>	80±2 <sup>c</sup>	0.272±0.084 <sup>a</sup>
	10.517±2.493 <sup>bc</sup>	1.317±0.184 <sup>a</sup>	11.833±2.669 <sup>bcd</sup>	1.48±0.132 <sup>cd</sup>	0.423±0.071 <sup>a</sup>	1.903±0.203 <sup>bc</sup>	85±3 <sup>cd</sup>	68±6 <sup>ab</sup>	83±3 <sup>bc</sup>	0.285±0.023 <sup>a</sup>
0.6	14.06±1.453 <sup>a</sup>	0.83±0.142 <sup>b</sup>	14.89±1.481 <sup>ab</sup>	1.75±0.137 <sup>b</sup>	0.307±0.035 <sup>ab</sup>	2.057±0.161 <sup>ab</sup>	88±1 <sup>ab</sup>	63±6 <sup>bc</sup>	86±1 <sup>ab</sup>	0.175±0.017 <sup>b</sup>
	16.423±1.646 <sup>a</sup>	0.62±0.01 <sup>b</sup>	17.043±1.647 <sup>a</sup>	1.967±0.126 <sup>a</sup>	0.287±0.012 <sup>ab</sup>	2.253±0.117 <sup>a</sup>	88±1 <sup>ab</sup>	54±2 <sup>c</sup>	87±1 <sup>ab</sup>	0.146±0.015 <sup>b</sup>
1.2	15.943±1.065 <sup>a</sup>	0.647±0.101 <sup>b</sup>	16.59±1.142 <sup>b</sup>	1.367±0.057 <sup>d</sup>	0.423±0.057 <sup>a</sup>	1.79±0.03 <sup>bc</sup>	91±1 <sup>a</sup>	34±3 <sup>d</sup>	89±1 <sup>a</sup>	0.311±0.052 <sup>a</sup>
	13.563±1.628 <sup>ab</sup>	0.283±0.092 <sup>c</sup>	13.847±1.563 <sup>abc</sup>	1.647±0.04 <sup>ab</sup>	0.233±0.067 <sup>b</sup>	1.88±0.04 <sup>bc</sup>	88±1 <sup>ab</sup>	17±4 <sup>e</sup>	86±2 <sup>ab</sup>	0.142±0.044 <sup>b</sup>
1.8	10.253±2.636 <sup>c</sup>	0.287±0.038 <sup>c</sup>	10.54±2.603 <sup>cd</sup>	1.45±0.139 <sup>cd</sup>	0.247±0.038 <sup>b</sup>	1.697±0.157 <sup>c</sup>	85±5 <sup>cd</sup>	14±4 <sup>e</sup>	83±5 <sup>bc</sup>	0.171±0.024 <sup>b</sup>

## 2.4 NaCl 胁迫对紫花苜蓿生理指标的影响

随着 NaCl 浓度增加,苜蓿 MDA 含量呈先增加后降低的趋势(NaCl 浓度为 0.3% 时除外),浓度为 0.6% 时最高。POD 活性在 NaCl 为 0.6% 和 1.5% 时,显著低于其他 NaCl 浓度( $P<0.05$ )。SOD 活性在高浓度(1.2%、1.5% 和 1.8%)NaCl 胁迫下显著高于低浓度胁迫( $P<0.05$ )。CAT 活性随 NaCl 浓度增加呈先增加后降低的趋势(0.3% 和 1.5% NaCl 浓度除外)。脯氨酸含量在 NaCl 为 0%、1.5% 和 1.8% 时显著高于其他浓度( $P<0.05$ )。随着 NaCl 浓度的增加,WSS 含量显著降低,SP 含量显著增加( $P<0.05$ ),但 0.9% 浓度时不显著(表 4)。

## 2.5 紫花苜蓿幼苗生长性状、生理特征与种子萌发的关系

紫花苜蓿幼苗苗长、根长、全株长、根鲜重、根干重、根绝对含水量与种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数基本呈极显著正相关( $P<0.01$ )(表 5)。

3 种抗氧化酶中,只有 SOD 酶活性与发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数呈极显著负相关( $P<0.01$ )。脯氨酸含量与发芽率、发芽势呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与种子活力指数呈显著负相关( $P<0.05$ )。可溶性糖含量与发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数呈显著正相关( $P<0.05$ )。可溶性蛋白含量与发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数呈极显著负相关( $P<0.01$ )(表 6)。

表 4 不同浓度 NaCl 处理下紫花苜蓿幼苗的生理特征

Table 4 Effects of different concentrations of NaCl on physiological parameters of alfalfa seedlings

NaCl 浓度/%	MDA/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ )	POD/ ( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ )	SOD/ ( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ )	CAT/ ( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ )	Proline/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	WSS/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	SP/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )
0	22.5±1 <sup>a</sup>	2 887±762 <sup>a</sup>	362±66 <sup>e</sup>	148±23 <sup>c</sup>	3.59±1.2 <sup>b</sup>	13.97±1.21 <sup>a</sup>	8.12±2.05 <sup>d</sup>
0.3	14.8±0.6 <sup>bc</sup>	3 003±262 <sup>a</sup>	659±147 <sup>d</sup>	92±10 <sup>d</sup>	1.99±0.41 <sup>cd</sup>	9.19±0.84 <sup>bc</sup>	9.36±0.59 <sup>cd</sup>
0.6	26.4±5.1 <sup>a</sup>	1 735±519 <sup>b</sup>	362±113 <sup>e</sup>	230±23 <sup>b</sup>	3.33±0.62 <sup>bc</sup>	11±1.98 <sup>b</sup>	10.95±0.51 <sup>cb</sup>
0.9	23.4±5.7 <sup>a</sup>	2 551±465 <sup>ab</sup>	408±50 <sup>e</sup>	280±23 <sup>a</sup>	1.93±0.19 <sup>cd</sup>	7.5±0.42 <sup>cd</sup>	8.69±0.85 <sup>cd</sup>
1.2	21.5±4.7 <sup>ab</sup>	2 354±239 <sup>ab</sup>	1 142±161 <sup>b</sup>	236±40 <sup>b</sup>	1.8±0.06 <sup>d</sup>	8.24±0.55 <sup>cd</sup>	11.7±0.97 <sup>b</sup>
1.5	21±1.9 <sup>ab</sup>	1 853±430 <sup>b</sup>	933±72 <sup>c</sup>	275±3 <sup>a</sup>	3.62±1.28 <sup>b</sup>	10.21±0.67 <sup>b</sup>	14.53±1.43 <sup>a</sup>
1.8	14.1±2.6 <sup>c</sup>	2 763±242 <sup>a</sup>	1 683±151 <sup>a</sup>	87±6 <sup>d</sup>	5.79±0.79 <sup>a</sup>	6.92±0.74 <sup>d</sup>	14.66±1.47 <sup>a</sup>

注:MDA,丙二醛;POD,过氧化氢酶;SOD,超氧化物歧化酶;CAT,过氧化氢酶;Proline,脯氨酸;WSS,可溶性糖;SP,可溶性蛋白。下同

表 5 紫花苜蓿幼苗生长性状与种子萌发的关系

Table 5 Linear correlation coefficient between seedling growth parameters and seed germination

参数	GR	GP	GI	VI	
长度	苗	0.676**	0.625**	0.467*	0.551**
	根	0.724**	0.825**	0.755**	0.716**
	全株	0.747**	0.840**	0.761**	0.730**
鲜重	苗	0.144	-0.12	-0.43	-0.015
	根	0.664**	0.821**	0.927**	0.602**
	全株	0.257	0.007	-0.31	0.08
干重	苗	0.275	0.151	-0.05	0.043
	根	0.530*	0.565**	0.546*	0.398
	全株	0.529*	0.419	0.203	0.231
绝对含水量	苗	0.022	-0.21	-0.462*	-0.088
	根	0.820**	0.936**	0.918**	0.779**
	全株	0.056	-0.18	-0.41	-0.059
根冠比		0.373	0.424	0.461*	0.338

注:“\*”代表在 0.05 水平显著相关,“\*\*”代表在 0.01 水平显著相关,下同

表 6 紫花苜蓿幼苗生理特征与种子萌发的关系

Table 6 Linear correlation coefficient between the physiological parameters of seedlings and seed germination

参数	GR	GP	GI	VI
SOD	-0.859**	-0.849**	-0.728**	-0.702**
CAT	0.279	0.001	-0.290	0.079
POD	-0.012	0.156	0.311	0.083
Proline	-0.748**	-0.578**	-0.357	-0.475*
WSS	0.464*	0.546*	0.676**	0.479*
SP	-0.783**	-0.839**	-0.806**	-0.730**
MDA	0.412	0.354	0.165	0.354

### 3 讨论

土壤盐渍化是我国面临的主要环境问题,其严重限制了植物的萌发与生长。紫花苜蓿较耐盐碱,是改良盐碱地的理想植物。但随着盐浓度的升高,对紫花苜蓿种子萌发的抑制效应越显著<sup>[19]</sup>,这在本研究也得到了相似的结果。但也有研究表明,NaCl 浓度过高时才抑制苜蓿种子的萌发,而低浓度的 NaCl 处理能促进发芽率、发芽势等<sup>[19-21]</sup>。另外,高浓度的 NaCl 胁迫抑制了苜蓿幼苗的长度及质量,但低浓度的 NaCl 胁迫因苜蓿品种的不同或抑制或促进<sup>[22]</sup>。在本研究中,低浓度 NaCl 处理诱导了苗高、根长和全株长的增加,促进了幼苗和全株鲜重、干重和绝对含水量的增加,但

抑制了根干重和鲜重的积累,且幼苗根冠比随 NaCl 浓度的增加显著降低,说明 NaCl 胁迫对根系抑制效应更显著。本研究表明,紫花苜蓿种子的萌发情况与幼苗根系的长度、重量及绝对含水量呈显著正相关,而与苗和全株的重量、绝对含水量关系基本不显著,这更加说明 NaCl 胁迫对紫花苜蓿根生长的抑制作用更显著。

紫花苜蓿发芽过程中受 NaCl 胁迫,其内部生理生化特性亦发生异常。一般情况下,NaCl 胁迫打破了植物体内活性氧的代谢平衡,从而使膜脂过氧化物的最终分解产物丙二醛随 NaCl 浓度的增加呈显著增加的趋势<sup>[23]</sup>。但本研究中,MDA 呈先增加后降低的趋势,这可能是由于高 NaCl 浓度抑制了弱势苜蓿种子的发芽,使剩余发芽的种子具有较高的抗盐性。这在本研究中得到了一定的证实,即保护性物质 SOD 的活性、脯氨酸含量和可溶性蛋白含量与种子萌发指标呈显著的负相关。

## 4 结论

(1) 随着 NaCl 浓度的增加,紫花苜蓿种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数呈降低的趋势。

(2) NaCl 胁迫影响了紫花苜蓿幼苗的形态特征,相比于苗和全株,对根生长的抑制作用更显著。

### 参考文献:

[1] 王玉刚,肖笃宁,李彦,等. 新疆三工河流域尾间绿洲地下水变化与土壤积盐的响应[J]. 生态学报,2007,27(10): 4036-4044.

[2] Cao J, Li X T, Kong X L, *et al.* Using alfalfa (*Medicago sativa*) to ameliorate salt-affected soils in Yingda irrigation district in Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 68-73.

[3] 刘艳军,范晶,韩学坤,等. 外源维生素对高 NaCl 胁迫下紫花苜蓿种子萌发及恢复性的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(26): 12-17.

[4] Li R L, Shi F C, Fukuda K J, *et al.* Effects of salt and alkali stress on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56: 725-733.

[5] 寇江涛. 盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发对外源 2,4-表油菜等内酯诱导的生理响应[J]. 草原与草坪, 2020, 40(5): 8-14.

[6] 周万海,师尚礼,寇江涛. 盐胁迫下外源 NO 对苜蓿幼苗生长及氮代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11):

3003-3008.

[7] 谢委,刘月,王艳,等. 不同盐胁迫对中牧一号紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(11): 157-161, 168.

[8] 程波,胡生荣,高永,等. 盐胁迫下五种紫花苜蓿萌发期抗盐性评估[J]. 北方园艺, 2018(22): 111-117.

[9] 杨存兴,杜文华. 6 份紫花苜蓿品种萌发期耐盐性评价[J]. 种子, 2015, 12(34): 40-43

[10] 马巧利,孙彦,杨青川,等. NaCl 和等渗 PEG4000 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及生理活性的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(3): 547-552.

[11] Xu X Y, Fan R, Zheng R, *et al.* Proteomic analysis of seed germination under salt stress in soybeans[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B: Biomedicine & Biotechnology*, 2011, 12(7): 507-517.

[12] 萧浪涛,王三根. 植物生理学试验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 172-174.

[13] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 258-260.

[14] 张殿忠,王沛红,赵慧贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法[J]. 植物生理学通讯, 1990, 26(4): 62-65.

[15] 张玉荣,刘通,周显青. 影响愈创木酚法测定玉米过氧化物酶活力的因素[J]. 粮油加工, 2008(3): 94-97.

[16] 周丹丹,吴文卫,杨逢乐,等. 两种过氧化氢酶活性测定方法的比较[J]. 江西农业学报, 2009, 21(1): 118-120.

[17] 邵从本,罗广华,王爱国,等. 几种检测超氧化物歧化酶活性反应的比较[J]. 植物生理学通讯, 1983(5): 46-49.

[18] Georgiou CD, Grintzalis K, Zervoudakis G, *et al.* Mechanism of coomassie brilliant blue G-250 binding to protein: a hydrophobic assay for nanogram quantities of proteins [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, 391: 391-403.

[19] 王健胜,牛磊,侯桂玲,等. 盐胁迫对不同品质苜蓿种子发芽性状的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(6): 39-43.

[20] 马琳. NaCl 胁迫对牧草种子萌发与幼苗生理生化的影响及耐盐性评价[M]. 泰安: 山东农业大学, 2010.

[21] 巴图,赵萌莉,李倩,等. 不同苜蓿品种种子发芽对盐胁迫的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 96-101.

[22] 苏爱莲,刘自学,王海亭,等. 盐胁迫对苜蓿种子发芽性状的影响及其耐盐性评价[J]. 中国农学通报, 2016, 32(14): 1-6.

[23] 龙明秀,许岳飞,何学青,等. NaCl 胁迫下紫花苜蓿幼苗抗氧化酶活性的研究[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 83-87.