

硝酸镧浸种对 NaCl 胁迫下柳枝稷种子 萌发及幼苗生理特性的影响

何学青, 梁卫卫, 常乐钦, 何树斌, 呼天明*

(西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西杨陵 712100)

摘 要:为探讨镧对 NaCl 胁迫下柳枝稷种子萌发及幼苗生理特性的影响, 该研究以柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 种子为研究材料, 通过不同浓度 (0、0.05、0.1、0.5 和 1.0 mmol/L) $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 溶液浸种 24 h 处理后, 添加 100 mmol/L NaCl 溶液, 以蒸馏水为对照, 在种子发芽箱中培养并观察柳枝稷种子萌发和幼苗生长, 测定幼苗叶片相对电导率、丙二醛、脯氨酸和叶绿素的含量。结果显示: (1) 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理可缓解 100 mmol/L NaCl 对种子发芽的影响。 (2) 不同处理对幼苗苗长无显著影响, 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种显著增加了幼苗的鲜重和叶面积, 当浓度 ≥ 0.5 mmol/L 时根长、根冠比、鲜重和叶面积受到抑制。 (3) 幼苗叶片相对电导率和脯氨酸含量随 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加呈先降低后增加的趋势, 其中 0.05 和 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理下效果较好, 丙二醛含量随 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加持续降低, 但各浓度处理间差异不显著, 叶绿素含量在 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理下较 NaCl 处理显著增加, 当浓度 ≥ 0.5 mmol/L 随着浸种浓度的增加呈下降趋势。 (4) 不同指标间发芽势与发芽率、根长和叶绿素含量间呈极显著正相关关系, 与根冠比、电导率和脯氨酸含量均呈极显著负相关关系, 而与苗长不相关。研究表明, 低浓度 (0.05 mmol/L) $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 可缓解 NaCl 胁迫对柳枝稷种子萌发及幼苗生长的影响, 而高浓度 (1.0 mmol/L) 的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 则会加重 NaCl 的胁迫危害。

关键词: 硝酸镧; 盐胁迫; 柳枝稷; 种子萌发; 幼苗生长; 生理特性

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effect of Lanthanum Nitrate on Seed Germination and Seedling Growth Characteristics of Switchgrass under NaCl Stress

HE Xueqing, LIANG Weiwei, CHANG Leqin, HE Shubin, HU Tianming*

(College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To investigate the effect of $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ on seed germination and seedling growth characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) under NaCl stress, we measured seed germination, seedling growth, relative electrical conductivity, MDA, proline and chlorophyll contents in incubator. Seeds were soaked in different concentrations (0, 0.05, 0.1, 0.5 and 1.0 mmol/L) of $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ for 24 h, and then added 100 mmol/L NaCl solution, with distilled water as control. The results showed that: (1) 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ could relieve 100 mmol/L NaCl effect on seed germination; (2) There was no significant effect on shoot length with different treatments, but 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ treatment significantly increased the

收稿日期: 2013-11-19; 修改稿收到日期: 2014-01-14

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2011BAD17B05); 中央高校基本科研业务费 (Z109021205); 西北农林科技大学博士科研启动基金 (Z109021111)

作者简介: 何学青 (1982—), 女, 博士, 讲师, 主要从事牧草与草坪草种子生理学研究。E-mail: hexueqing@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者: 呼天明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事牧草遗传育种及种质资源方面研究。E-mail: hutianming@126.com

fresh weight and leaf area of seedlings. When the concentration ≥ 0.5 mmol/L, root length, root shoot ratio, fresh weight and leaf area were all inhibited significantly; (3) The relative electrical conductivity and proline content of seedling leaves decreased firstly and then increased with increasing $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ concentration, of which 0.05 and 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ treatment were better, the MDA content increased with increasing $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ concentration has been reduced. The chlorophyll content increased with 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ treatment comparing with NaCl, and decreased with increasing $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ concentration. However, there were no significant difference among different concentration treatments. (4) Different factors between the germination potential and germination rate, had a significantly positive correlation between root length and chlorophyll content, and had a significantly negative correlation with the root shoot ratio, relative electrical conductivity, and proline content. However, it was no significant correlation between germination potential and shoot length. This research indicated that low concentration (0.05 mmol/L) of $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ could alleviate NaCl stress, high concentration (1.0 mmol/L) of $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ could increase the stress.

Key words: $\text{La}(\text{NO}_3)_3$; salt stress; switchgrass; seed germination; seedling growth; physiological characteristics

随着全球气候暖化问题的日益加剧,土壤盐渍化已成为全球性关心的问题,全球约有 7% 的土地受到盐渍化的威胁,而且这个数字还在不断上升。中国是土壤盐渍化比较严重的国家,盐渍化土壤面积大,分布广,对区域农业发展构成了严重的威胁^[1]。根据中国国情,可在盐碱土等边际土地上发展利用能源作物。能源草是纤维素乙醇的主要来源之一,因为其易于收获、抗逆性强和适应性广等特点,成为能源植物的焦点^[2]。柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)属于禾本科(Poaceae)黍属(*Panicum*),为多年生 C_4 草本植物,原产地北美,其根系发达,分蘖能力强,具有适应性广泛、耐旱、耐瘠薄等优点,已成为美国能源植物研究的模式植物,在全世界获得了广泛的应用^[3]。中国在 20 世纪 80 年代从美国引进了高产柳枝稷品种,作为防风固沙、水土保持植物和在荒漠化土壤种植的优良抗逆性牧草,发展潜力巨大^[4]。以往有研究表明盐处理对柳枝稷种子的萌发和幼苗农艺性状有影响,如于晓丹等^[5]研究发现,柳枝稷种子发芽率随着盐浓度的增加逐渐降低,在萌发初期,各浓度的盐溶液都具有抑制作用。杜菲等^[6]研究发现柳枝稷地方野生种播种期耐盐性较差,苗期耐盐性良好。范希峰等^[7]研究表明,高浓度 NaCl 胁迫严重影响柳枝稷的生长发芽,限制其在盐渍化土地上的推广应用。左海涛等^[8]研究了盐分类型、浓度、土壤含水量和土壤类型等因素对营养生长期柳枝稷产生的影响,以明确柳枝稷对盐渍化边际土地的适应性。由于植物在种子萌发时期,易遭受盐胁迫伤害。因此,提高柳枝稷种子在萌发期间的耐盐性,对柳枝稷在盐碱化边际土地的栽培利用及减轻盐胁迫对柳枝稷的影响具有重要意义。

稀土是中国优势的自然资源,储量位居世界首位^[9],稀土可与生物细胞质膜上的生物大分子如多糖、蛋白、核酸以及磷脂形成比较稳定的复合物,从而影响生物细胞膜内外的离子平衡和其它生理生化代谢过程。同时稀土离子还可与细胞质膜结合,提高细胞膜的保护功能,增强氧化酶活性以及减少电解质外渗量,从而增强了生物对逆境的抵御能力^[10]。镧是商业稀土肥料的主要成分之一,并且在地球上的蕴藏量较高,在稀土元素中含量较高。同时它在稀土元素中水合离子半径最小,化学性质最活泼且副作用最小^[11]。有研究表明^[12-13]:一定浓度硝酸镧处理可促进盐胁迫下幼苗生长,增强其保护酶系统活性,降低膜脂过氧化产物含量及细胞膜相对透性,缓解盐害,提高作物对逆境胁迫的适应能力。目前,镧对逆境下植物生长的影响在水稻(*Oryza sativa*)^[14]、小麦(*Triticum aestivum*)^[15]、菜豆(*Phaseolus vulgaris*)和玉米(*Zea mays*)^[16]、大豆(*Glycine max*)^[17]、油菜(*Brassica campestris*)^[18]、黄瓜(*Cucumis sativus*)^[19]等农作物,药用植物甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)^[20]和圆叶决明(*Chamaecrista rotundifolia*)^[21]等上开展了相关研究,而有关 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理对牧草抗盐胁迫的研究主要在苜蓿(*Medicago sativa*)^[22]和多年生黑麦草(*Lolium perenne*)^[23]上,但硝酸镧是否可以缓解盐胁迫对柳枝稷种子萌发及幼苗生长的影响,目前尚未见报道。基于此,本试验拟探讨硝酸镧浸种对 NaCl 胁迫下柳枝稷萌发及幼苗生理特性的影响,揭示盐胁迫下稀土元素镧对柳枝稷抗盐能力的生理学机制,为柳枝稷在盐渍化边际土地上推广种植和稀土元素在草业上的推广应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试柳枝稷种子由中国科学院水土保持研究所程积民研究员提供,品种为 Alamo,采集地为宁夏固原,收获年份为 2012 年。种子清选后,根据牧草种子检验规程^[24]测得千粒重为 1.393 g,生活力为 93%,试验于 2013 年 3~4 月份在西北农林科技大学草业科学实验室进行。

1.2 试验方法

1.2.1 溶液配制 用蒸馏水配制浓度为 100 mmol/L NaCl 溶液和浓度分别为 0.05、0.1、0.5 和 1.0 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 溶液。

1.2.2 种子处理 将大小一致、饱满均匀的种子,分别用 0、0.05、0.1、0.5 和 1.0 mmol/L 的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 溶液在 25 °C 黑暗条件下浸种 24 h,分别记为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 ,将种子从溶液中取出后均匀摆放在铺有双层滤纸、直径为 12 cm 的培养皿中,每培养皿 100 粒,每处理 3 次重复,在每处理的培养皿中加 8 mL 100 mmol/L NaCl 溶液,以蒸馏水处理作为对照(CK),试剂添加完成后,记录每个培养皿的重量。

1.2.3 种子发芽 将培养皿置于人工气候箱中,在 25 °C 条件下培养(光照 16 h,黑暗 8 h),每天按记录重量称重添加蒸馏水,以保持溶液浓度恒定,并逐日统计发芽种子数,“露白”则视为发芽,发芽持续 21 d。

1.3 测定指标

1.3.1 发芽指标的测定 根据如下公式计算发芽相关的指标:

$$\text{发芽势} = \frac{\text{前 7 d 发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$\text{发芽指数} = \sum \frac{Gt}{Dt}$ (Gt 表示 t 日内的发芽数; Dt 表示相应的发芽天数)^[25]

$$\text{活力指数}(VI_1) = \text{幼苗长度}(\text{cm}) \times \text{发芽率}(\%)$$

$$\text{活力指数}(VI_2) = \text{幼苗鲜重}(\text{g}) \times \text{发芽率}(\%)$$
^[26]

$$\text{相对发芽频率}(F_i) = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^K N_i} \times 100\% \quad (N_i \text{ 表示每}$$

天发芽的种子数; K 表示发芽持续的天数)^[27]

1.3.2 幼苗生长指标的测定 发芽末期,叶片完全展开时,从每个培养皿中随机选取 10 株幼苗,蒸馏水冲洗干净后,用滤纸吸干幼苗表面水分,置于滤纸

上,用直尺测量幼苗的根长和苗长并记录;计算根冠比:根冠比=苗长/根长;用镊子夹住幼苗,放在分析天平上称量并记录鲜重;用叶面积分析仪(Yaxin1240)测定幼苗叶面积的大小。

1.3.3 幼苗生理特性的测定 发芽试验结束后,幼苗叶片的相对电导率采用电导法^[28]、脯氨酸含量用酸性茚三酮法、叶绿素含量采用分光光度法、丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[29]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析,用 Duncan's 法多重比较,并对各指标做 Person 相关分析。用 Origin 8.5 作图软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对柳枝稷种子发芽的影响

由表 1 可知,在 T_1 处理下,发芽势和发芽指数均较对照(CK)显著下降,发芽率较对照下降 6%,而活力指数 VI_1 和 VI_2 分别较对照下降 12% 和 18%,但 3 个指标与对照相比均无显著差异,不同浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 预浸种处理对柳枝稷种子在 100 mmol/L NaCl 处理下发芽的影响不同。其中在 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 预先浸种处理(T_2)后,所有指标均较 T_1 处理提高,但仅发芽指数显著增加。0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 预先浸种处理(T_3)后,活力指数(VI_2)达到最大(1.1),较 T_1 处理显著提高了 31%。当 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度 ≥ 0.5 mmol/L 时,所有指标均呈现下降趋势,但仅发芽势与发芽指数呈显著变化,其他指标变化不显著。不同处理后的相对发芽频率呈现与发芽势相似的趋势(图 1),表明低浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 溶液可以缓解盐胁迫对柳枝稷种子发芽率的抑制作用,而高浓度则起抑制作用。

2.2 不同处理对柳枝稷种子幼苗生长的影响

不同处理对柳枝稷种子幼苗生长的影响如图 2 所示, T_1 处理下,幼苗鲜重、根长、苗长和根冠比与对照相比,差异不显著,而叶面积与对照相比,呈显著增加,在不同浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理后,随 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加,苗长变化不显著,而根长和根冠比的变化趋势相似,在 0.05 和 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理后,根长、根冠比较 T_1 处理变化不显著,当 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度 ≥ 0.5 mmol/L 时,根长显著下降,根冠比随其浓度显著增加,随 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加,鲜重和叶面积先增加后降低,并在 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理下达到最大值。结果表明 100 mmol/L NaCl 对幼苗叶面积有显著促进作用,

表 1 不同处理对柳枝稷种子发芽的影响

Table 1 The effect on seed germination under different treatments

处理 Treatment	发芽势 Germination energy/%	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	
				VI ₁	VI ₂
CK	88±4.5a	93±3.5a	20.3±0.8a	3381.9±72.8a	0.93±0.09ab
T ₁	80±3.2b	87±4.2a	18.8±1.3b	2981.4±187.3a	0.76±0.04b
T ₂	85±2.1ab	90±2.0a	20.3±0.3a	3075.4±216.5a	0.92±0.11ab
T ₃	80±5.1b	90±1.7a	18.5±1.0b	3022.1±50.2a	1.1±0.13a
T ₄	76±3.0c	89±3.8a	16.8±0.5c	2263.9±97.0b	0.71±0.01b
T ₅	54±4.0d	79±6.4b	12.8±0.5d	2041.2±79.9b	0.69±0.06b

注:平均值±标准误。同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:mean±standard error. Different letters within the same column indicate significant difference between the different treatments at 0.05 level.

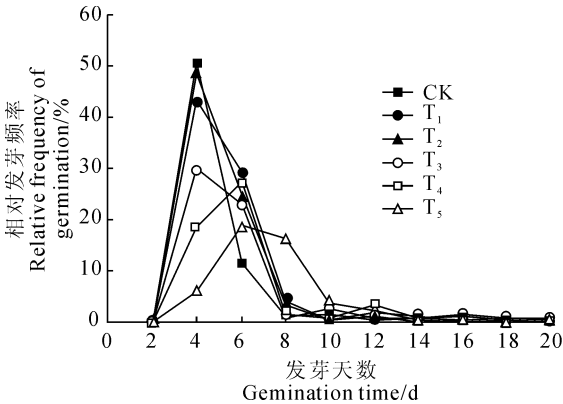


图 1 不同处理对柳枝稷相对发芽频率的影响

Fig.1 The effect on relative frequency of germination under different treatments

而对其它幼苗生长指标有抑制,但无显著影响,而低浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ (0.1 mmol/L)处理对各指标有缓解作用,高浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ (≥ 0.5 mmol/L)处理对各指标产生抑制作用。

2.3 不同处理对柳枝稷种子幼苗叶片生理特性的影响

不同处理对柳枝稷种子幼苗叶片的相对电导率、叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量,和脯氨酸含量的影响如图 3 所示,T₁ 处理下相对电导率由对照的 1.88%增加为 2.19%,但二者之间差异不显著,叶绿素的含量与对照相比,显著下降,MDA 含量较对照显著增加,脯氨酸含量由对照的 112.1 $\mu\text{g/g}$ 增加到 147.1 $\mu\text{g/g}$,但二者之间差异不显著。在不同浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 预浸种处理后,相对电导率随浸种浓度的增加呈先降低后增加的趋势,其中在浓度为 0.05 和 0.1 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理时下降,而随着 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加相对电导率值增加,叶绿素含量随 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度的增加,与对照相比呈显著下降,MDA 含量随浓度增加呈显著下降趋势,脯

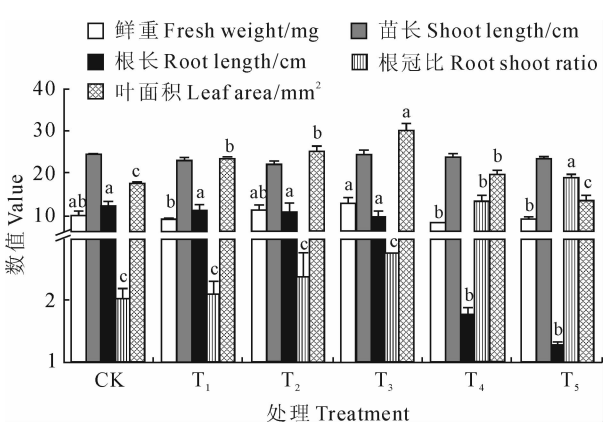


图 2 不同处理对柳枝稷幼苗生长的影响

同一指标不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下图同

Fig.2 The effect on seedling growth of switchgrass under different treatments

Different letters for the same index indicate significant difference between different treatments at

0.05 level. The same as below

氨酸含量在浓度为 0.1~0.5 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理时较 T₁ 处理下降,但各浓度处理间差异不显著,而在浓度为 1.0 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 预浸种处理后,脯氨酸含量较其他处理显著增加,说明低浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 可缓解 NaCl 胁迫,高浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ (1 mmol/L)则会加重胁迫。

2.4 各测定指标间的相关性分析

不同处理后各测定指标间的相关性分析如表 2 所示,发芽势与发芽率、根长和叶绿素含量间呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.813、0.619 和 0.612,而与根冠比、相对电导率和脯氨酸含量均呈极显著负相关,相关系数分别为-0.761、-0.738 和-0.907,发芽率与根冠比和相对电导率间均呈显著负相关($P<0.05$),与叶绿素含量间呈显著正相关,而与脯氨酸含量间呈极显著负相关,脯氨酸含量

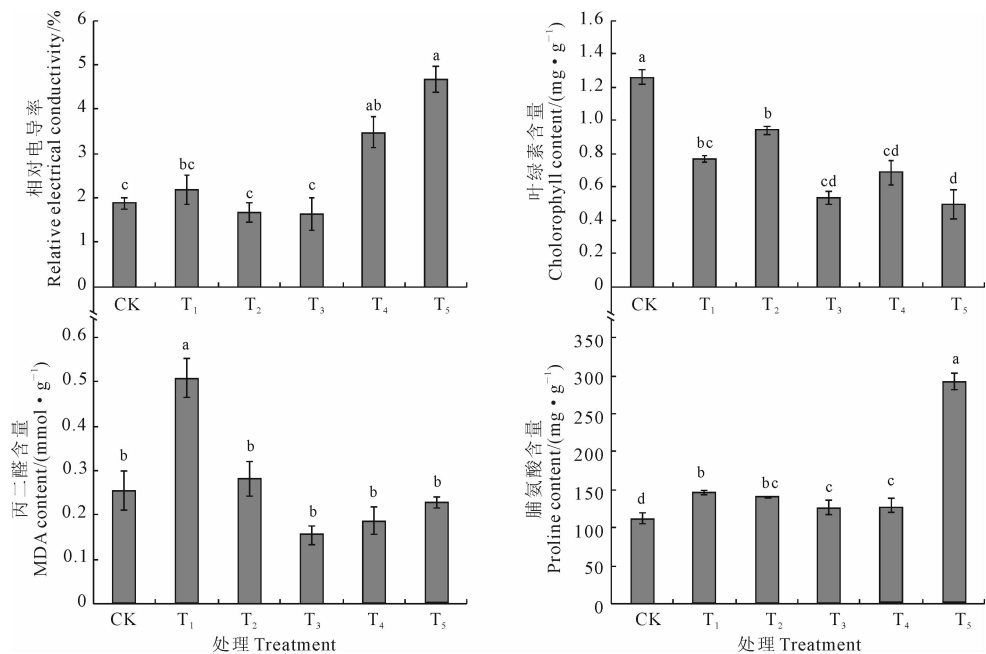


图 3 不同处理对柳枝稷幼苗生理特性的影响

Fig. 3 The effect on physiological characteristics of switchgrass seedling under different treatments

表 2 各测定指标间的相关性分析

Table 2 Correlation coefficient of different indexes under different treatments

指标 Indexes	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L
A	1										
B	0.813 **	1									
C	0.639 **	0.368	1								
D	0.141	0.187	0.098	1							
E	0.085	0.052	0.467	0.432	1						
F	0.438	0.199	0.512 *	0.161	0.625 **	1					
G	-0.761 **	-0.522 *	-0.909 **	-0.061	-0.450	-0.662 **	1	*			
H	-0.735 **	-0.516 *	-0.727 **	-0.404	-0.570 *	-0.647 **	0.786 **	1			
I	0.309	0.239	0.499 *	0.040	-0.011	-0.318	-0.341	-0.113	1		
K	0.612 **	0.522 *	0.556 *	0.077	0.011	-0.083	-0.559 *	-0.406	0.763 **	1	
L	-0.907 **	-0.786 **	-0.594 **	-0.140	-0.226	-0.580 *	0.754 **	0.682 **	-0.227	-0.508 *	1

注: A. 发芽势; B. 发芽率; C. 根长; D. 苗长; E. 鲜重; F. 叶面积; G. 根冠比; H. 电导率; I. 丙二醛; K. 叶绿素; L. 脯氨酸; ** 表示 0.01 水平上显著相关; * 表示 0.05 水平上显著相关。

Note: A. Germination energy; B. Germination rate; C. Root length; D. Shoot length; E. Fresh weight; F. Leaf area; G. Root shoot ratio; H. Relative electrical conductivity; I. MDA content; K. Chlorophyll content; L. Proline content; ** & * indicate significant correlation at 0.01 level and 0.05 level, respectively.

除与苗长、鲜重、丙二醛和叶绿素含量间不相关,与其他指标间均显著相关,MDA 含量仅与根长呈显著正相关,相对电导率值除与苗长、MDA 和叶绿素含量不相关外,与其他指标均显著相关,以上结果表明,发芽势、发芽率、根冠比、电导率、叶绿素含量和脯氨酸含量能够较准确反映不同浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理后各指标的变化。

3 讨 论

环境胁迫亦可影响植物的生长发育和形态结

构,盐碱土中的盐分对植物产生胁迫,降低了种子的发芽率和生长速率,导致出苗不齐,幼苗生长受到抑制。范希峰等^[7]研究表明,在 0~100 mmol/L 浓度范围内的 NaCl 胁迫下,随着 NaCl 浓度的升高,柳枝稷的株高、分蘖数、叶长等生长性状逐渐增加,超过 100 mmol/L 则开始下降,所以本试验以 100 mmol/L 浓度作为盐胁迫浓度,探讨 NaCl 胁迫下柳枝稷种子萌发与幼苗的生长。本研究发现在 NaCl 胁迫下柳枝稷种子的发芽势和发芽指数均较对照显著下降,这与于晓丹等^[5]的研究结果相一致,而本研

究采用 0.05 mmol/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理后可缓解 NaCl 胁迫对柳枝稷种子发芽的影响。

根长、苗长、根冠比、鲜重和叶面积是研究植物生长常用的指标,反映了植物生长的好坏和幼苗健壮的潜能。刘凤兰等^[30]研究表明,0.03 mmol/L 的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种,可显著增加红小豆幼苗的根系活力,缓解盐胁迫造成的伤害大幅度提高了根长、鲜重,高浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种具有明显的抑制作用,刘良全等^[31]对小麦的研究表明,适当的化学调控物质 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 等的浸种可显著增加小麦的苗长、根冠比、叶面积。本试验发现在不同浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种处理下,低浓度(≤ 0.1 mmol/L) $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 可缓解 NaCl 胁迫对柳枝稷幼苗生长的影响,而高浓度则直到抑制作用。因此,不同植物种对 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 的需求程度也有差异。

相对电导率、MDA 含量、脯氨酸含量都可作为植物抗逆性的指标。因此,测定这些指标可间接了解植物膜系统受损程度以及植物的抗逆性。杜菲等^[6]对不同材料柳枝稷种子在盐胁迫下幼苗生长的影响结果表明随着 NaCl 浓度的增加,电导率、MDA 含量和脯氨酸含量均显著增加。本研究发现 100 mmol/L NaCl 胁迫下柳枝稷幼苗脯氨酸含量、细胞膜透性、MDA 含量都呈上升趋势,与上述研究结果相似。本研究发现适宜浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种可显著降低柳枝稷幼苗膜质过氧化水平,但高浓度 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理会显著增加幼苗膜透性。这与高永生等^[32]在盐胁迫处理下稀土镧对小麦幼苗叶片抗氧化系统的活性影响中得到的结果相似,这可能是因为低浓度的 La^{3+} 改变了幼苗叶片中的脂肪酸配比,从而在一定程度上能够维持柳枝稷叶片的膜稳定性,而高浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 处理则加剧了柳枝稷幼苗叶片的膜质过氧化水平,高浓度的 La^{3+} 本身会对

植物造成伤害,也可能是 La^{3+} 抑制了幼苗对 Ca^{2+} 的吸收,最终降低了钙对柳枝稷叶片细胞膜的稳定作用^[17]。

叶绿体是植物进行光合作用的主要场所,而叶绿素又是叶绿体中的主要色素,其含量高,说明该植物有着较强的光合潜能,叶绿素是反映植物体内光合能力强弱的重要生理指标。许多研究表明,稀土元素对植物的光合作用有很大的影响。本研究发现硝酸镧处理对柳枝稷幼苗叶绿素含量的影响较为明显,浓度为 0.05~0.5 mmol/L 的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种均可提高 100 mmol/L NaCl 胁迫下柳枝稷幼苗的叶绿素含量,表现为低浓度的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 提高叶绿素含量,而高浓度处理则降低幼苗叶绿素含量。以往有研究表明 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 能够引起光以及色素含量变化的原因可能是由于低浓度 La^{3+} 激活了叶绿素合成过程中的某些酶类,而高浓度 La^{3+} 可能会抑制叶绿素合成过程中某些相关酶的活性或者能激活叶绿素酶,并且加速其分解所致^[33]。也有研究认为由于 NaCl 胁迫抑制了幼苗对 Mg^{2+} 的吸收,而 La^{3+} 却可以替代 Mg^{2+} 的作用,促进了叶绿素的合成^[34]。

镧并非植物的必需元素,它可能影响植物体内细胞膜以及一些酶的生理功能,在适宜的浓度下可提高植物产量,当 La^{3+} 浓度过高时,就会表现出重金属离子的一些特性,如抑制酶活性和结合膜蛋白,对植物生长造成一定的伤害^[35]。长期使用镧处理可能会使其在土壤中积累并产生污染,因而稀土元素在草业中的使用应慎重,必须考虑到稀土对生态系统的负面效应。本试验研究了 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浸种对 NaCl 胁迫下柳枝稷种子萌发和幼苗生长的影响,再结合培育新的耐盐柳枝稷新品种,为柳枝稷在中国盐渍化土地大面积推广种植提供参考依据。

参考文献:

- [1] LI J G(李建国),PU L J(濮励杰),ZHU M(朱 明),*et al.* The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. *Acta Geographica Sinica*(地理学报),2012,**67**(9):1 233—1 245(in Chinese).
- [2] MCLAUGHLIN S B,KSZOS L A. Development of switchgrass(*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States[J]. *Biomass and Bioenergy*,2005,**28**(6):515—535.
- [3] LIU J L(刘吉利),ZHU W B(朱万斌),XIE G H(谢光辉),*et al.* The development of *Panicum virgatum* as an energy crop[J]. *Acta Pratacul Turae Sinica*(草业学报),2009,**18**(3):232—240(in Chinese).
- [4] XIAO H(肖 晖),WANG X(王 珣),SONG Y(宋 洋),*et al.* Advances in biofuel ethanol from bioenergy crop switchgrass[J]. *Pratacul Science*(草业科学),2011,**28**(3):487—492(in Chinese).
- [5] YU X D(于晓丹),DU F(杜 菲),ZHANG Y W(张蕴薇). Effects of salt stress on switchgrass seed germination and seedling growth[J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报),2010,**18**(6):810—815(in Chinese).
- [6] DU F(杜 菲),CHEN X(陈 新),YANG C H(杨春华)*et al.* Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of different switchgrass materials[J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报),2011,**19**(6):1 018—1 024(in Chinese).

- [7] FAN X F(范希峰), HOU X C(侯新村), ZHU Y(朱毅), *et al.* Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2012, **23**(6): 1 476—1 480(in Chinese).
- [8] ZUO H T(左海涛), LI J W(李继伟), GUO B(郭斌), *et al.* Effect of soil saline type and concentration as well as soil water content on the growth characteristics of switchgrass at the vegetative stage on two soil matrixes[J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报), 2009, **17**(6): 760—766(in Chinese).
- [9] LI Y Y(李永裕), PAN T F(潘腾飞), QIU D L(邱栋梁). Advances of studies on the biological mechanism of rare earth elements in plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2005, **21**(12): 217—221(in Chinese).
- [10] 杨光梅. 稀土 La^{3+} 对辣根细胞膜的影响[D]. 江苏无锡: 江南大学, 2012.
- [11] QIU L(邱琳), ZHOU Q(周青). Review on the effects of rare earth elements on seed germination[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*(中国农业生态学报), 2008, **16**(2): 529—533(in Chinese).
- [12] GAO H J(郇红建), CHANG J(常江), ZHANG Z L(张自立), *et al.* Physiological effects of rare earth elements on stress resistance in plant[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2003, **21**(5): 477—479(in Chinese).
- [13] RENTEL M C, KNIGHT M R. Oxidative stress induced calcium signaling in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2004, **135**(3): 1 471—1 479.
- [14] ZHANG J(张杰), LIU D Y(刘登义), HUANG Y J(黄永杰), *et al.* Effects of seed soaking with La^{3+} on seed germination and seedling growth of rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2005, **24**(8): 893—896(in Chinese).
- [15] SHI D P(史东平), YANG X(杨笑), ZHANG Y Q(张永清). Effects of lanthanum on the growth and physiological characteristics of wheat seedling under salt stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报), 2008, **28**(4): 730—736(in Chinese).
- [16] HUANG X H(黄晓华), ZHOU Q(周青). Protective effects of lanthanum on bean and corn under cadmium stress[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2005, **23**(2): 245—249(in Chinese).
- [17] PAN D K(潘登奎), ZHANG J T(张金桐), YANG J P(杨家朴), *et al.* Influence of LaCl_3 on activity of Cu, Zn-SOD in Soybean[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2003, **21**(3): 339—342(in Chinese).
- [18] WU X F(吴学峰), MEI J S(梅晋松), CHU L(储玲), *et al.* Effect of seed soaking with $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ on seed germination and seedling growth of rape under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2007, **26**(8): 1 159—1 164(in Chinese).
- [19] GAO Q H(高青海), WANG X F(王秀峰), SHI Q H(史庆华), *et al.* Effects of lanthanum on the plant growth and leaf antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under nitrate stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(5): 976—980(in Chinese).
- [20] PEI W M(裴文梅), LI Q C(李琼翠), DUAN X J(段晓健), *et al.* Effects of lanthanum on yield and quality of licorice[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北农业学报), 2012, **21**(4): 127—130(in Chinese).
- [21] JIANG ZH W(姜照伟), WENG B Q(翁伯琦), HUANG Y F(黄元仿), *et al.* Comparison of effects of lanthanum application on growth by spraying and soil dressing in *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Acta Agronomica Sinica*(作物学报), 2008, **34**(7): 1 273—1 279(in Chinese).
- [22] WANG L K(王立克), HONG F SH(洪法水). Effect of lanthanum ions on the germination and amount of absorbing water of medic seed[J]. *Grassland of Science*(中国草地), 2003, **25**(6): 27—31(in Chinese).
- [23] LIU J X(刘建新), WANG X(王鑫), HU H B(胡浩斌), *et al.* Effects of $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ on plant growth and leaf photosynthetic physiology of ryegrass(*Lolium perenne* L.) seedlings under alkaline stress[J]. *Bulletin of Botanical Research*(植物研究), 2010, **30**(6): 674—679(in Chinese).
- [24] 王彦荣, 孙建华, 余玲, 等. GB/T 2930. 4-2001 牧草种子检验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [25] 颜启传. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 112.
- [26] ABDULBAK A A, ANDERSON J D. Vigor determination in soybean by multiple criteria[J]. *Crop Science*, 1973, **13**(6): 630—633.
- [27] RANAL M A, SANTANA D G. How and why to measure the germination process[J]. *Revista Brasil Botany*, 2006, **29**(1): 1—11.
- [28] 赵世杰, 等. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 305—306.
- [29] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [30] LIU F L(刘凤兰), ZHANG Y Q(张永清), JIA R(贾蕊), *et al.* Effect of seed soaking with $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ on root and seedling growth of adzuki bean under different concentrations NaCl stresses[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*(武汉植物学研究), 2009, **27**(4): 397—402(in Chinese).
- [31] LIU L Q(刘良全), ZHANG Y SH L(张水利), JING X Y(景小元). Effect of seed soaking with four chemical regulators on root and seedling growth of different wheat genotypes under NaCl stresses[J]. *Journal of Triticeae Crops*(麦类作物学报), 2010, **30**(1): 73—78(in Chinese).
- [32] GAO Y SH(高永生), CH J SH(陈集双). Effects of La^{3+} on antioxidant system in wheat seedling leaves under salt stress[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报), 2005, **23**(4): 490—495(in Chinese).
- [33] LIAO T J(廖铁军), YE ZH M(叶兆明). Quantity and quality effects of rare earth on spinach and its physiological effects researching[J]. *Chinese Rare Earth*(稀土), 1992, **13**(2): 62—64(in Chinese).
- [34] HONG F SH(洪法水), WEI ZH G(魏正贵), ZHAO G W(赵贵文). The relationship between La^{3+} and spinach chlorophyll[J]. *Science in China*(中国科学), 2001, **31**(5): 15—16(in Chinese).
- [35] IPPOLITO M P, COSTANTINO P, LUIGI DA, *et al.* Effect of rare earth elements on growth and antioxidant metabolism in *Lemna minor* L. [J]. *Caryologia*, 2007, **60**(1): 125—128.