

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.10.008

# 碱胁迫对燕麦幼苗生理指标的响应

赵明德, 李惠梅, 马静, 刘晶

青海民族大学 生态环境与资源学院/青藏高寒湿地修复工程中心, 西宁 810007

**摘要:** 在室温(16~25 °C)条件下研究青燕一号和加燕一号在 0, 25, 50, 100, 150, 200 mmol/L 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液胁迫下其丙二醛质量分数、SOD 酶活性、可溶性糖质量分数、叶绿素质量分数以及生物量和茎长的生长响应, 从而筛选出耐碱品种及最适生长浓度, 为改善生态环境以及为农业获得更好的种植资源提供一定的理论依据和参考。结果表明: ① 两种燕麦的丙二醛质量分数都呈先升高后降低趋势, 且在碱浓度大于等于 50 mmol/L 时青燕一号的丙二醛质量分数高于加燕一号; ② 青燕一号和加燕一号 SOD 酶活性在相同碱胁迫下与 0 mmol/L 相比均呈上升趋势; ③ 青燕一号的可溶性糖质量分数呈先升高后降低再升高的趋势, 加燕一号的可溶性糖质量分数呈先升高后降低趋势, 说明青燕一号的渗透调节能力更强; ④ 两种燕麦的叶绿素质量分数均呈下降趋势, 说明碱胁迫对叶绿素的危害显著; ⑤ 低浓度(25 mmol/L)促进茎的生长, 高浓度(50, 100, 150, 200 mmol/L)抑制茎的生长; ⑥ 随着碱浓度的升高, 青燕一号地上部分和加燕一号地上部分与地下部分的生物量均呈先升高后逐步降低的趋势; ⑦ 青燕一号和加燕一号的根尖着色情况随碱浓度的升高而加深。综上所述, 青燕一号长势更好且耐碱性更强。

**关键词:** 碱胁迫; 燕麦; 生理指标

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)10-0058-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Response of Alkali Stress to Physiological Indexes of Oat Seedlings

ZHAO Mingde, LI Huimei, MA Jing, LIU Jing

*College of Ecological Environment and Resources, Qinghai University for Nationalities/**Qinghai Tibet Alpine Wetland Restoration Project Center, Xining 810007, China*

**Abstract:** The growth responses of Qingyan No. 1 and Jiayan No. 1 under the stress of 0, 25, 50, 100, 150 and 200 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution were studied at room temperature (16–25 °C), and the growth re-

收稿日期: 2020-07-03

基金项目: 青海省自然科学基金项目(2020-ZJ-957Q); 青海民族大学 2021 年度校级项目(2021XJGH30); 第四批青海省“高端创新人才千人计划”; 青藏高原脆弱生态恢复治理与保护研究科研创新团队项目。

作者简介: 赵明德, 博士, 副教授, 主要从事生态环境保护的研究。

通信作者: 刘晶, 博士, 副教授。

sponses of malondialdehyde, soluble sugar, chlorophyll mass fraction, SOD enzyme activity, biomass and stem length were obtained, so as to screen alkali resistant varieties and the optimum growth concentration. It provides a certain theoretical basis and reference for improving the ecological environment and obtaining better planting resources for agriculture. The results showed that: ① the MDA content of the two oats increased first and then decreased, and when the alkali concentration was greater than 50 mmol/L, the MDA content of Qingyan No. 1 was higher than that of Jiayan No. 1; ② The SOD activities of Qingyan No. 1 and Jiayan No. 1 showed an upward trend compared with 0 mmol/L under the same alkali stress; ③ The soluble sugar content of Qingyan No. 1 increased first, then decreased, and then increased. The soluble sugar content of Jiayan No. 1 increased first and then decreased, indicating that Qingyan No. 1 has stronger osmotic regulation ability; ④ The chlorophyll content of both oats showed a downward trend, indicating that alkali stress did significant harm to chlorophyll; ⑤ Low concentration (25 mmol/L) promoted the growth of stem, and high concentration (50, 100, 150, 200 mmol/L) inhibited the growth of stem; ⑥ With the increase of alkali concentration, the biomass of aboveground part of Qingyan No. 1 and aboveground part and underground part of Jiayan No. 1 increased first and then decreased gradually; ⑦ The root tip coloring of Qingyan No. 1 and Jiayan No. 1 deepened with the increase of alkali concentration. In conclusion, Qingyan No. 1 grows better and has stronger alkaline resistance.

**Key words:** Alkali stress; Oats; Physiological indexes

我国现阶段土地碱化越来越严重, 造成该现象的原因包括生态自然因素及人文因素. 因此, 我们必须研究方法治理土地碱化问题. 盐碱地是陆地上分布最广的一种土壤类型, 它遍及地球上 30 多个国家<sup>[1]</sup>, 总面积达 9.54 亿  $\text{hm}^2$ , 约占世界总陆地面积的 1/3, 现已成为全球陆地最受关注的环境问题之一<sup>[1-2]</sup>. 土壤盐碱化导致全球可利用耕地日益缩减<sup>[3]</sup>, 并制约着作物产量和品质的提高, 成为世界农业可持续发展的重要限制性因素. 我国陆地土壤碱化度普遍较高, 碱化土壤的形成, 大部分是与土壤中碳酸盐的累积有关. 严重的盐碱土壤地区, 植物几乎是无法生存的. 碱性土壤湿润时容易膨胀、泥泞、分散, 干燥时便收缩、坚硬、板结, 导致它的通气性能和透水性能都特别差, 且土壤碱化程度越高其理化性状越差. 青海高原地区近年来由于自然环境气候和人为因素的干扰强度不断扩大, 致使草地上的植被也随之遭到严重破坏并大面积退化, 使碱地面积越来越多; 由于耕作方式的不当导致次生碱地的面积也越来越多<sup>[4]</sup>. 青海高原地区的碱地主要含  $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 但以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为主; 现阶段关于碱胁迫的研究在国内外还不多见<sup>[5-6]</sup>, 因此本实验将专门研究碱胁迫, 了解碱胁迫下作物的响应机制, 培育耐碱品种, 掌握提高作物抗碱措施, 对碱地进行生物治理及合理开发利用具有重要的现实意义. 种植耐碱植物成本低、见效快更是农牧业进一步增产增收的重要举措.

燕麦 *Avena sativa* L. 是禾谷类作物, 属禾本科、燕麦族、燕麦属, 它是世界各地广泛栽培种植的一种重要粮食兼饲草、饲料作物, 是治理土壤碱化和荒漠化的优良品种. 燕麦早在几千年前就有文字记载, 因此它是一种特别古老的禾谷类作物. 燕麦中富含蛋白质、脂肪、赖氨酸以及亚油酸, 长期食用燕麦可以降低胆固醇在心血管中的积累, 可有效防止老年高血压、糖尿病、高血脂等. 近年来, 随着我国消费者的健康饮食兴起, 燕麦行业市场规模持续增长. 其中, 早餐燕麦市场规模增速较快, 尤其随着电商的快速发展, 互联网用户规模的扩大, 网上零售成为我国燕麦行业销售渠道的重要发展方向. 燕麦片被用作代餐产品, 富含蛋白质、碳水化合物、膳食纤维和多种微量元素, 作为主食引起的血糖变化较缓, 其营养价值高, 还具有健身功效, 是减肥利器, 早餐耗时少, 适合老中青, 深受各类人群的喜爱. 燕麦在低浓度的碱胁迫下可以通

过渗透调节来减轻细胞所受的伤害,对碱胁迫具有一定的抗性<sup>[7]</sup>.因此通过研究  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对不同燕麦的根部死亡情况、可溶性糖的质量分数、丙二醛的质量分数、叶绿素质量分数、SOD 酶活性的变化情况、地下与地上部分的生物量、茎长等生理指标的影响,从而筛选出耐碱品种与最适浓度,以及燕麦对碱胁迫的响应机制及缓解的主要措施.通过这些指标的研究结果得出对碱胁迫的影响机制,以期为碱地的开发和改善碱地生态环境以及农业获得更好的种植资源提供一定的理论依据和参考.

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验所用青燕一号和加燕一号均是由青海省海北州门源县浩门农场提供且挑选的种子成熟饱满.

### 1.2 实验方法

挑选颗粒饱满的种子用温水泡 24 h 后用 70% 的乙醇溶液进行表面消毒 30 s,然后置于 1% 的次氯酸钠溶液中对种子表面消毒 8 min,最后用蒸馏水冲洗 5 遍,直到没有次氯酸钠刺鼻气味为止<sup>[8]</sup>.经过消毒处理后,将种子置于光照强度 3 000~5 000 Lx,温度 16~25 °C 条件下进行萌发,待种子萌发后选取长势良好的幼苗,设置不同的碱胁迫并置于室温(16~25 °C)条件下生长.测定并记录 0 h,24 h,48 h,72 h,96 h 两种燕麦的茎高,每个处理 3 次重复.待 96 h 后检测地上与地下部分的生物量,可将根茎分离,根部用于检测幼苗根尖细胞死亡情况,茎用于测定可溶性糖质量分数、丙二醛质量分数、SOD 酶活性和叶绿素质量分数.

### 1.3 测定指标及方法

燕麦幼苗根尖细胞死亡情况的检测采用台盼蓝染色法<sup>[9]</sup>;丙二醛的测定采用丙二醛与硫代巴比妥酸(TBA)成色反应的原理,在 520 nm 处进行比色;可溶性糖质量分数的测定采用蒽酮比色法<sup>[10]</sup>;SOD 酶活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法<sup>[11]</sup>;生物量的测定采用称量法;叶绿素质量分数的测定采用分光光度计法<sup>[12-13]</sup>;茎长的测定采用尺量法.

### 1.4 数据处理和分析

利用 Excel 2007 进行数据处理并绘制图,借助 SPSS 25.0 进行数据的方差分析.

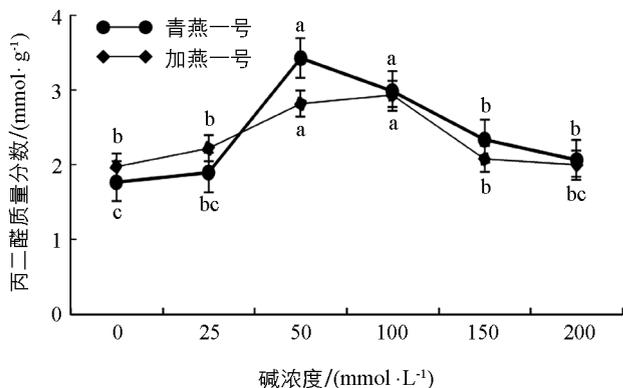
## 2 结果和分析

### 2.1 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号丙二醛质量分数的影响

植物器官在逆境下往往会发生膜脂过氧化作用,丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终分解产物,其质量分数可以反映植物遭受逆境伤害的程度.从图 1 可以看出,青燕一号和加燕一号的丙二醛质量分数随碱浓度的升高呈先增加后降低的趋势.青燕一号丙二醛质量分数在碱浓度 50 mmol/L 时达到最大值;加燕一号在碱浓度 100 mmol/L 时达到最大值.并且青燕一号和加燕一号在碱胁迫 25 mmol/L,50 mmol/L 下丙二醛质量分数增加明显.

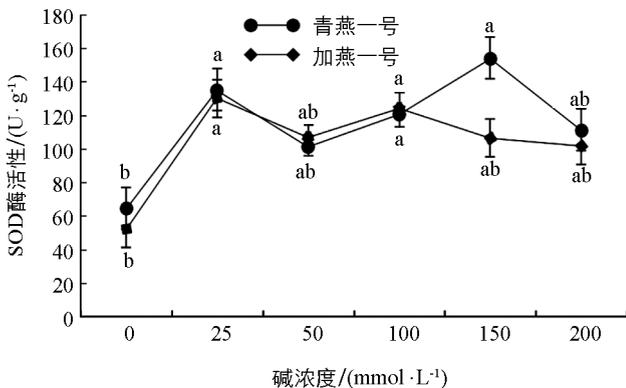
### 2.2 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是生物体内重要的抗氧化酶,也是植物抗氧化系统的第一道防线,它能清除细胞中多余的超氧阴离子,其活性的高低水平体现了植物对氧化损伤的修复能力.从图 2 可以看出,青燕一号和加燕一号 SOD 酶活性在相同碱胁迫浓度下与 0 mmol/L(对照组)相比均呈上升趋势,且在碱胁迫 25 mmol/L 处理下青燕一号和加燕一号的 SOD 酶活性差异有统计学意义.在相同碱胁迫下,青燕一号 SOD 酶活性大多高于加燕一号 SOD 酶活性.



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 1 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号丙二醛质量分数的影响



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

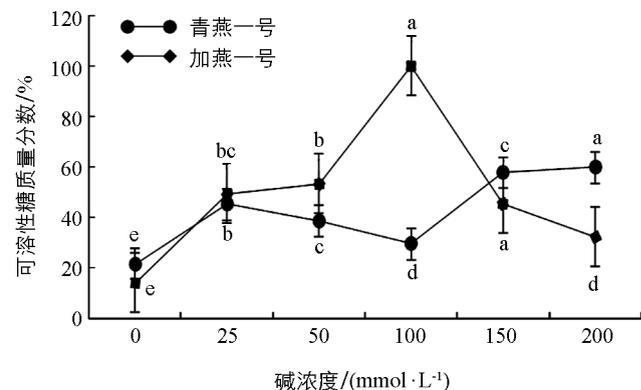
图 2 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号 SOD 酶活性的影响

### 2.3 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号可溶性糖质量分数的影响

可溶性糖是植物在逆境条件下体内产生的一种渗透调节物质, 其浓度的大小可影响幼苗叶片的渗透势进而提高幼苗的吸水能力. 从图 3 可以看出, 加燕一号可溶性糖质量分数随碱胁迫梯度呈先升高后降低趋势, 青燕一号可溶性糖质量分数随碱胁迫梯度呈先升高后降低再升高趋势. 从数据可以看出, 在高碱胁迫下青燕一号的耐受性更强. 在碱胁迫 100 mmol/L 时青燕一号和加燕一号可溶性糖质量分数均发生相反的转折.

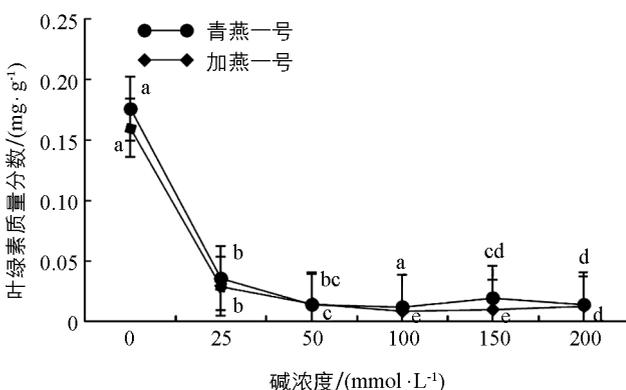
### 2.4 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号叶绿素质量分数的影响

叶绿素是绿色植物进行光合作用的基础物质, 它能把吸收的二氧化碳和水合成有机物, 作为植物生长所需的能量储存起来. 从图 4 可以看出, 青燕一号和加燕一号叶绿素质量分数随碱胁迫梯度的增大均呈降低趋势, 且 25 mmol/L 碱胁迫与 0 mmol/L (对照组) 对比叶绿素质量分数下降趋势明显. 实验结果表明: 在低浓度碱胁迫下叶绿素就会受到较大影响且两种燕麦受损程度相当.



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 3 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号可溶性糖质量分数的影响



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 4 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号叶绿素质量分数的影响

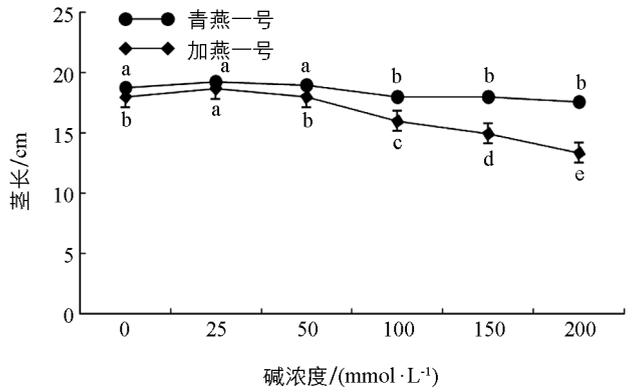
### 2.5 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号茎长的影响

实验通过尺量法测量了不同碱胁迫下青燕一号和加燕一号在不同时间的幼苗茎长变化情况. 每隔 24 h

测量 1 次. 图 5 为 96 h 后青燕一号和加燕一号的茎长情况, 可以看出经过碱胁迫处理的青燕一号的茎长显著高于加燕一号的茎长且加燕一号受碱胁迫影响显著. 青燕一号和加燕一号在低浓度(25 mmol/L)碱胁迫下幼苗呈生长趋势, 从碱胁迫 50 mmol/L 开始呈下降趋势. 由此可知碱胁迫对燕麦生长起双重作用, 即低浓度促进高浓度抑制.

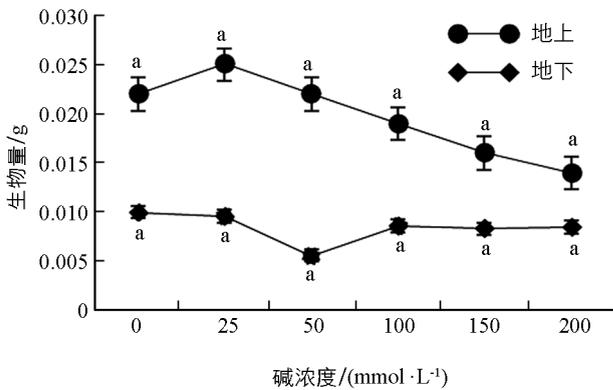
### 2.6 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号生物量的影响

从图 6 和图 7 中可以看出, 随着碱浓度的升高, 青燕一号地上部分和加燕一号地上部分与地下部分的生物量均呈先升高后逐步降低的趋势, 即低浓度(25 mmol/L)促进高浓度( $\geq 50$  mmol/L)抑制. 加燕一号碱胁迫对地上部分生物量的影响较明显, 而两种燕麦地下部分的生物量在碱胁迫下差异无统计学意义.



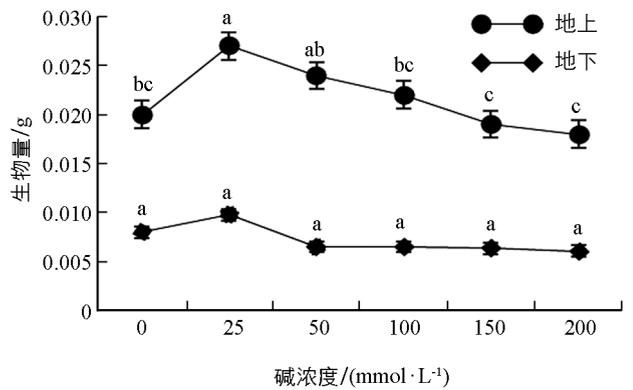
图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 5 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号茎长的影响



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 6 不同碱胁迫对青燕一号生物量的影响



图中小写字母不同表示在不同碱浓度处理下差异有统计学意义,  $p < 0.05$ .

图 7 不同碱胁迫对加燕一号生物量的影响

### 2.7 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号根尖死亡情况的影响

根尖细胞死亡情况用台盼蓝染色法: 用配制的台盼蓝溶液处理准备好的幼苗根尖, 如果幼苗的根尖细胞有损伤或者死亡的情况时, 台盼蓝就会透过已经变性的细胞膜与膜里面解体的 DNA 分子结合并使其着色, 因此可以用该方法辨别细胞的死亡情况或者观测根尖细胞损伤情况; 幼苗根尖细胞死亡或者损伤数目越多, 蓝色越明显, 反之颜色越浅<sup>[14]</sup>. 从图 8 可以看出, 青燕一号和加燕一号的根尖着色情况随碱浓度的升高而加深, 即幼苗根尖细胞随碱浓度的增大死亡率逐渐增大. 在碱浓度超过 100 mmol/L 时, 加燕一号的根尖着色情况明显深于青燕一号, 说明加燕一号在高浓度碱胁迫下根尖细胞死亡较青燕一号多, 即青燕一号较加燕一号更耐碱生存.

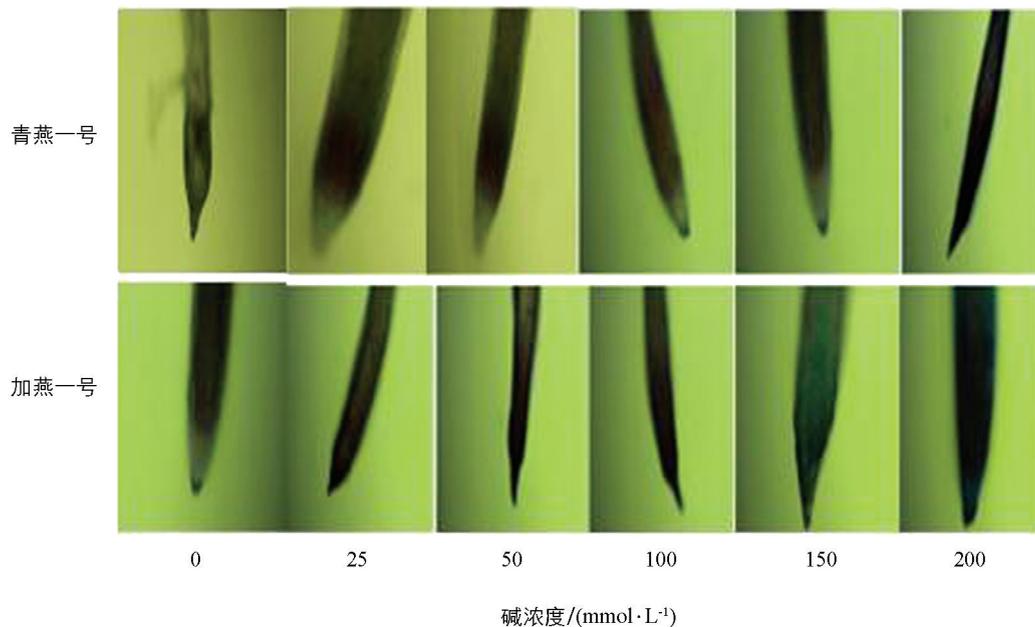


图 8 不同碱胁迫对青燕一号和加燕一号根尖死亡情况的影响

### 3 结论和讨论

#### 3.1 结论

1) 通过实验得出, 碱胁迫导致两种燕麦存活率减小, 严重破坏光合色素和膜系统; 在碱胁迫环境下青燕一号和加燕一号都会通过机体自身做出一定的调节去适应轻微逆境并减少逆境带来的危害. 碱逆境会对植物造成渗透胁迫并干扰其营养离子的平衡, 进而影响新陈代谢, 对植株的生长发育造成不良的影响, 导致生物量积累降低<sup>[15-16]</sup>.

2) 本实验表明, 不同品种对逆境有不同的响应, 丙二醛质量分数积累越多表明组织的保护能力越弱, 在碱胁迫( $\geq 50$  mmol/L)时, 青燕一号的自我保护能力比加燕一号要弱. 青燕一号和加燕一号通过 SOD 酶活性和可溶性糖的动态变化, 在一定程度上维持了渗透平衡, SOD 酶活性增加提高了活性氧的清除能力, SOD 酶主要功能是消除生物体在新陈代谢过程中产生的有害物质. 如果 SOD 酶活性突然增高, 说明植物生长状态不良, 需要 SOD 酶来清除有害物质. SOD 酶活性高过一段时间后, 植物生长状态好转. 叶绿素是光合作用的重要物质, 而  $Mg^{2+}$  是叶绿素合成的必要元素, 碱胁迫会导致  $Mg^{2+}$  沉淀, 进而使得叶绿素合成受阻<sup>[17]</sup>, 因此, 青燕一号和加燕一号的叶绿素质量分数下降趋势显著. 幼苗的生长及生物量趋势随碱胁迫梯度做出低浓度促进高浓度抑制的响应<sup>[16]</sup>. 根据细胞根尖情况明显能够看出青燕一号比加燕一号更耐碱.

3) 通过实验前期的操作过程及后期的数据验证, 结合碱胁迫对多数生理指标的响应, 可以得出青燕一号较加燕一号耐碱, 且青燕一号的适宜生长碱浓度一般在 25 mmol/L.

#### 3.2 讨论

1) 刘志华等<sup>[18]</sup>研究表明, 植物要在碱环境中生存就要以降低生长为代价来适应碱环境, 同时适宜碱浓度又能刺激植物生长. 田敏等<sup>[19]</sup>研究指出, MDA 是膜脂氧化的最终分解产物, 其质量分数可以反映植物遭受盐碱胁迫的程度, MDA 是衡量植物细胞膜系统受到氧化胁迫的重要观察指标. 克热木·伊力等<sup>[20]</sup>认为, MDA 积累越多表明组织的保护能力越弱. 本实验研究表明, 青燕一号和加燕一号的丙二醛质量分数随碱浓度的升高呈先增加后降低的趋势. 出现该现象可能是因为两种燕麦在碱胁迫梯度处理下具有

一个缓冲过程且对碱地具有一定的耐受性。

2) 逆境胁迫下,植物体内发生氧化胁迫,破坏了酶系统对氧代谢的平衡,植物体可自身提高抗氧化系统活力来平衡活性氧代谢<sup>[21]</sup>。SOD 酶对防止自由基活性氧的毒害至关重要,高 SOD 酶活性维持时间越长,其清除自由基的能力就越强,从而植物的抗逆性也就越强<sup>[22]</sup>。本实验研究结果表明,青燕一号和加燕一号 SOD 酶活性与实验对照组相比都呈上升趋势,但在不同碱处理下表现出不同的响应,可能是不同浓度下青燕一号和家燕一号抗逆性不同。

3) 在逆境下,植物受到外界环境的胁迫,会使其细胞失水,因此植物为了确保自身能够正常生长,便会分泌一些渗透调节物质,以此来提高细胞内溶质浓度,降低水势,使细胞可以从外界吸水。植物这种通过合成或积累渗透调节物质主动适应逆境环境的现象被称为渗透调节<sup>[23]</sup>。可溶性糖是植物在逆境胁迫下的主要渗透物质。本实验研究结果表明,青燕一号和加燕一号在逆境胁迫下都会通过改变自身的代谢来应对碱胁迫,其可溶性糖质量分数在不同碱处理下都有不同的响应,但与对照组相比较都呈上升趋势。分析认为植物通过增加可溶性糖质量分数降低渗透势,促进顶端叶片保持正常含水量,以保持正常的形态与生理状态。

4) 许多研究证明,植物种子在萌发期与幼苗形成期对碱胁迫比较敏感,此时幼苗的生长受到明显抑制,成株抗性普遍较高<sup>[24]</sup>。种子的萌发能力和幼苗长势是植株耐碱性早期鉴定及耐碱个体、品种早期选择的基础。刘炳响等<sup>[25]</sup>研究表明生长在碱环境中的植株,当土壤溶液中碱成分超过一定质量分数时就会对植物生长产生危害,主要包括离子毒害、渗透胁迫和营养不均衡等。本实验研究结果表明,低浓度碱胁迫几乎没有抑制青燕一号和加燕一号种子的萌发,高浓度碱胁迫则明显抑制,与上述研究结果一致。造成这种结果的原因可能是低浓度碱溶液促进了细胞膜的渗透调节,或是微量无机离子对呼吸酶产生刺激作用<sup>[26]</sup>;而高浓度溶液抑制种子萌发可能是由于碱离子的渗透效应和毒性效应<sup>[27]</sup>。结果表明低浓度处理促进生长,高浓度处理抑制生长。

## 参考文献:

- [1] 李 彬,王志春,孙志高,等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154-158.
- [2] 孙 娟. 河北省海岸带土壤盐渍化研究 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19(2): 72-75.
- [3] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展 [J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455.
- [4] 雷 芝,董玉平,雷 莉,等. 土壤次生盐碱化的原因与防治措施 [J]. 农村科技, 2005(4): 11-12.
- [5] 朱志华,胡荣海,宋景芝,等. 盐胁迫对不同小麦品种种子萌发的影响 [J]. 作物品种资源, 1996(4): 25-29.
- [6] PRADO F E, BOERO C, GALLARDO M, et al. Effect of NaCl on Germination, Growth, and Soluble Sugar Content in *Chenopodium Quinoa* Willd. Seeds [J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2000, 41(1): 27-34.
- [7] 雷雪峰,赵宝平,刘景辉,等. 燕麦对盐碱胁迫的响应机制及缓解措施研究进展 [J]. 种子, 2019, 38(4): 62-66.
- [8] 赵明德,刘 攀,杨 冲,等. 盐胁迫对青藏高原多年生牧草幼苗生理指标的影响 [J]. 生态科学, 2018, 37(3): 123-130.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 西安:世界图书出版公司, 2000: 101-102.
- [10] 叶红霞,张海林. 3 种披碱草属牧草对比试验 [J]. 青海草业, 2007, 16(3): 12-14, 32.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京:高等教育出版社, 2000: 184-261.
- [12] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术 [M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [13] 代 颖,杨雅馨,廖 鑫,等. 尖孢镰孢菌侵染后大豆的生理生化指标检测 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 81-86.
- [14] 刘晓龙,徐 晨,徐克章,等. 盐胁迫对水稻叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 作物杂志, 2014(2): 88-92.
- [15] 王俭珍,刘 倩,高娅妮,等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.

- [16] 谢国生, 朱伯华, 彭旭辉, 等. 水稻苗期对不同 pH 值下 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 胁迫响应的比较 [J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(2): 121-124.
- [17] LAM E, KATO N, LAWTON M. Programmed Cell Death, Mitochondria and the Plant Hypersensitive Response [J]. Nature, 2001, 411(6839): 848-853.
- [18] 刘志华, 赵可夫. 盐胁迫对獐茅生长及 Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 含量的影响 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(3): 311-316.
- [19] 田 敏, 饶龙兵, 李纪元. 植物细胞中的活性氧及其生理作用 [J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(2): 235-241.
- [20] 克热木·伊力, 袁 琳, 齐曼·尤努斯, 等. 盐胁迫对阿月浑子 SOD、CAT、POD 活性的影响 [J]. 新疆农业科学, 2004, 41(3): 129-134.
- [21] COSTA FRANÇA M G, PHAM THI A T, PIMENTEL C, et al. Differences in Growth and Water Relations among Phaseolus Vulgaris Cultivars in Response to Induced Drought Stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 43(3): 227-237.
- [22] 张 耿, 高洪文, 王 赞, 等. 偃麦草属植物苗期耐盐性指标筛选及综合评价 [J]. 草业学报, 2007, 16(4): 55-61.
- [23] 焦德志, 赵泽龙. 盐碱胁迫对植物形态和生理生化影响及植物响应的研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20): 1-4.
- [24] DODD G L, DONOVAN L A. Water Potential and Ionic Effects on Germination and Seedling Growth of Two Cold Desert Shrubs [J]. American Journal of Botany, 1999, 86(8): 1146-1153.
- [25] 刘炳响, 梁海永, 李子敬, 等. 不同盐碱条件下白榆器官中 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 分布特征 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 7-11.
- [26] 郭 彦, 杨洪双, 赵家斌. 混合盐碱对大豆种子萌发的影响 [J]. 种子, 2008, 27(12): 92-94.
- [27] 杨春武, 贾娜尔·阿汗, 石德成, 等. 复杂盐碱条件对星星草种子萌发的影响 [J]. 草业学报, 2006, 15(5): 45-51.

责任编辑 周仁惠