

## 混合盐碱处理下蚕豆叶片生理指标的变化

乔 枫<sup>1</sup>, 耿贵工<sup>2</sup>, 陈 志<sup>1\*</sup>

(1. 青海师范大学青藏高原资源与环境教育部重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海省农林科学院作物栽培育种所, 青海 西宁 810016)

**摘 要:** 为了研究蚕豆在混合盐碱胁迫下的生理变化, 试验采用 3 种盐碱胁迫方式 KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理 2 周, 测定蚕豆鲜重、丙二醛和脯氨酸含量、抗氧化酶活性等生理指标。结果表明, 随着盐碱胁迫时间的延长, 蚕豆鲜重表现为先升高后下降趋势, 丙二醛和脯氨酸含量呈上升趋势, 其中脯氨酸含量在处理 11 d 时急剧增加; 随胁迫时间的延长, 4 种抗氧化酶 SOD、POD、CAT、APX 活性增加幅度呈先升高后降低趋势, 其中处理 11 d 时, 酶活性增加幅度顺序是 SOD > CAT > APX 或 POD。结论: 蚕豆盐碱胁迫中, SOD 酶活性发挥首要作用, 脯氨酸是一种重要的渗透物质。

**关键词:** 蚕豆 (*Vicia faba* L.); 叶片; 盐碱胁迫; 生理指标

**中图分类号:** S529.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0162-04

## Physiological responses of *Vicia faba* L. leaves to salt-alkali stress

QIAO Feng<sup>1</sup>, GENG Gui-gong<sup>2</sup>, CHEN Zhi<sup>1\*</sup>

(1. Education Ministry Key Lab of Environment and Resource in Qinghai-Tibet Plateau,

Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China;

2. Institute of Crop Breeding and Cultivation, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry, Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** In attempt to study physiologic responses of *Vicia faba* L. to salt-alkali stress, seedlings of *Vicia faba* L. were treated with three different combinations of salts, KCl/NaCl, KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, for 2 weeks. The fresh weight of seedlings and malondialdehyde(MDA) were then measured, and free proline contents and antioxidant enzymes activity of leaf were further analyzed. The results indicated that with extensions of stress time, malondialdehyde (MDA) and free proline contents were increased, while the freshweight of seedlings was increased at first and then decreased. Free proline contents increased sharply at 11 days of stress. Activities of four antioxidant enzymes, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), were increased at first, were then decreased. At 11 days of stress, order of the activity increments of these four antioxidant enzymes was SOD > CAT > APX or POD. In conclusion, SOD played critical role in the response of *Vicia faba* L. to salt-alkali stress, and free proline an important osmotic substance.

**Keywords:** *Vicia faba* L.; leaf; salt-alkali stress; physiological responses

植物生长在高浓度盐碱、干旱、重金属、水涝等逆境土壤中,严重影响植物的正常生长发育、生理生化代谢等。蚕豆(*Vicia faba* L.)是重要的粮、菜、肥兼用型作物,全国各地都有种植,有关蚕豆的逆境生理生化研究有许多报道<sup>[1-16]</sup>。蚕豆盐碱胁迫研究有报道,如用不同浓度的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液处理蚕豆,100 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理时明显抑制了蚕豆幼苗的生长;超过 75 mmol·L<sup>-1</sup>时,蚕豆幼苗 MDA 含量急剧上

升,脯氨酸含量增加明显;随 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度的升高,蚕豆幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + b 的含量先升高后降低<sup>[2-3]</sup>。不同 pH 值的酸碱溶液处理蚕豆,处理 5 h 的蚕豆叶片 SOD 活性远大于处理 12 h 的 SOD 活性;较长时间处理下的 CAT 活性基本上高于短时间处理的 CAT 活性;短时间处理下 POD 活性均显著低于对照值,较长时间处理下 POD 活性变化的规律性不强,且变化幅度较小;pH 5.5 处理 5 h 的叶

收稿日期:2013-03-05

基金项目:国家科技支撑计划“祁连山湿地生态系统修复保护技术集成与示范”(2012BAC08B04)

作者简介:乔 枫(1973—),女,博士,副教授,主要从事植物生理和分子生物学研究。E-mail:qiaofnm@163.com。

\* 通信作者:陈 志(1963—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事植物资源研究。E-mail:cz58@163.com。

片脯氨酸含量最高,处理 12 h 脯氨酸含量的变化不大;处理 5 h 时丙二醛含量的变化随 pH 的降低略有下降,但处理 12 h 丙二醛含量的变化不大<sup>[4-5]</sup>。蚕豆生长的土壤环境,通常包括多种盐碱成分,并不是以单一成分存在,所以非常有必要研究混合盐碱胁迫下蚕豆生理生化的变化。本研究采用 3 种混合盐碱 KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 方式胁迫蚕豆幼苗,研究蚕豆幼苗生长、脯氨酸含量、丙二醛含量和几种抗氧化酶活性的变化,进一步探讨蚕豆在混合盐碱环境中的生长能力和反应,为蚕豆的栽培生理和种植条件提供一定的理论依据,有利于在大田环境中推广和运用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料培养

选成熟饱满的蚕豆(*Vicia faba* L.)籽粒,用自来水冲洗数次,用 75% 的乙醇处理消毒 20 min,蒸馏水冲洗 3~5 次。将种子置于铺有白毛巾的铁盘子里,在光照培养箱中 28℃ 萌芽 4 d,每天用自来水冲洗 3 次,保持湿润。种子发芽后,选取一致种芽的种子播种于装有基质(草炭:蛭石为 2:1)直径 20 cm 有孔的塑料钵中,每钵定苗 5 株。同时浇灌适量的水(每钵用量相同)。播种后于自然环境中生长,幼苗长至四叶时,进行胁迫处理。

### 1.2 盐碱胁迫

KCl、NaCl、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (分析纯)浓度均为 200 mmol·L<sup>-1</sup>,用去离子水配制,混合处理体积比均为 1:1。选取长势均匀的蚕豆幼苗,平均每个植株有 8~9 个完全展开叶,分别用不同混合溶液 KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理,每天浇灌 1 次,浇灌量(40 ml)为蛭石持水量的二倍,以保持各个处理液浓度的恒定,同时以水浇灌作为对照,共处理 14 d。每个处理 12 盆,胁迫后 5 d、8 d、11 d、14 d,取完整植株,用去离子水快速冲洗掉蛭石和灰尘,用吸水纸吸干植株表面残留的去离子水后称重即为鲜重;选取相同叶位的叶片进行生理指标的测定和分析,每处理 3 次重复,数据取平均值。

### 1.3 酶提取液的制备

酶提取液:50 mmol·L<sup>-1</sup>,pH 值 7.8 的磷酸缓冲液(PBS)配制,含有 0.1 mmol·L<sup>-1</sup>乙二胺四乙酸(EDTA)、质量浓度为 0.3% TritonX-100 和质量浓度为 4% 聚乙烯吡咯烷酮(PVP),4℃ 保存。

称取蚕豆鲜叶 0.3~1 g,加少量石英砂,加少量冰冷的酶提取液,冰浴研磨,后定容至 10 mL,4℃ 离心(8 000 r·min<sup>-1</sup>,10 min),取上清液冷藏备用。用

于超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的测定。

### 1.4 测定指标及方法

SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法<sup>[17]</sup>、CAT 活性测定采用紫外吸收法<sup>[17]</sup>、POD 活性测定采用愈创木酚显色法<sup>[18]</sup>、MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[17]</sup>、脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法显色法<sup>[17]</sup>。APX 活性参照 Nakano 和 Asada(1981)的方法<sup>[19]</sup>。

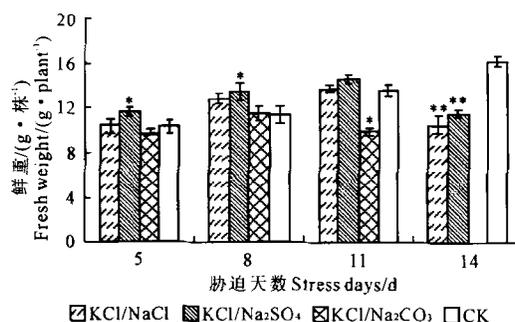
数据处理、绘图及标准差、方差等统计学计算用 Excel 程序,DPS 7.55 统计分析差异显著性。

## 2 结果与分析

KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理蚕豆幼苗 12~13 d 时植株根茎部完全变黑、死亡,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理 15~16 d 时植株死亡。

### 2.1 鲜重、丙二醛、脯氨酸含量的变化

不同盐碱处理蚕豆叶片随时间变化,鲜重、丙二醛(MDA)、脯氨酸含量变化分别见图 1~图 3。由图 1 表明,与对照相比,胁迫时间延长至 14 d,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的蚕豆鲜重含量极显著下降( $P < 0.01$ ),鲜重分别是对照的 63.07%、70.19%。由图 2 和图 3 显示,随着胁迫时间延长,丙二醛、脯氨酸含量总体呈上升趋势,处理 11 d 时,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理的脯氨酸(极)显著增加( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ),分别是对照的 5.11、2.95、3.03 倍,且增加幅度高于丙二醛的幅度;处理 14 d 时,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的脯氨酸含量极显著增加( $P < 0.01$ ),分别是对照的 5.93、3.53 倍,且增加幅度高于丙二醛的幅度。



注: \* 表示在 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: \* indicates significant difference at 0.05 level; \*\* indicates significant difference at 0.01 level. Hereinafter the same.

图 1 胁迫处理对蚕豆鲜重含量的影响

Fig.1 The freshweight of *Vicia faba* L. seedlings under different stress conditions

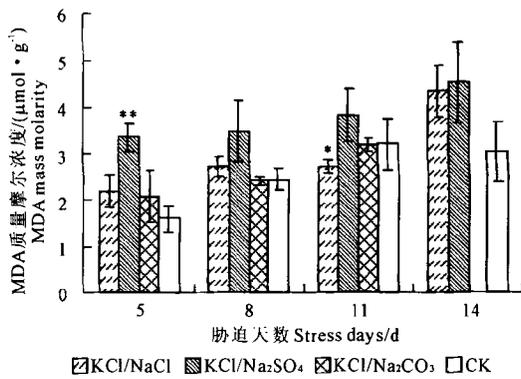


图 2 胁迫处理对蚕豆叶片丙二醛含量的影响  
Fig.2 The malondialdehyde contents of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

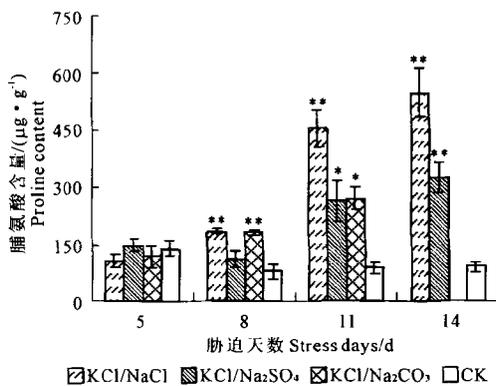


图 3 胁迫处理对蚕豆叶片脯氨酸含量的影响  
Fig.3 The free proline contents of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

### 2.2 超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

与对照相比,不同盐碱处理蚕豆叶片 SOD 活性增加幅度随时间延长表现为先升高后降低的趋势(见图 4)。

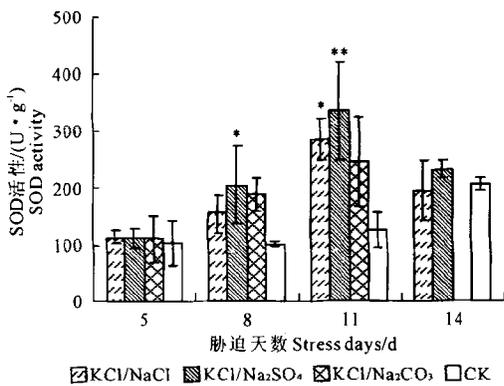


图 4 胁迫处理对蚕豆叶片 SOD 活性的影响  
Fig.4 The SOD activities of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

图 4 表明, KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理连续 11 d 蚕豆叶片 SOD 活性分别高于对照,分

别增加了 125.79% ( $P < 0.05$ )、164.67% ( $P < 0.01$ )、94.67%,且达到最高值;在 14 d 时,SOD 活性增加幅度降低。

### 2.3 过氧化物酶(POD)活性的变化

不同盐碱处理蚕豆叶片随时间变化 POD 活性变化见图 5。由图 5 可见,与对照相比,3 种胁迫下蚕豆 POD 活性增加幅度随处理天数延长呈先增加后降低趋势。其中处理 11 d 时,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 分别比对照增加了 39.41%、75.03% ( $P < 0.01$ )、32.38%;处理 14 d 时,KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的 POD 活性下降,分别是对照的 68.53%、73.76%。

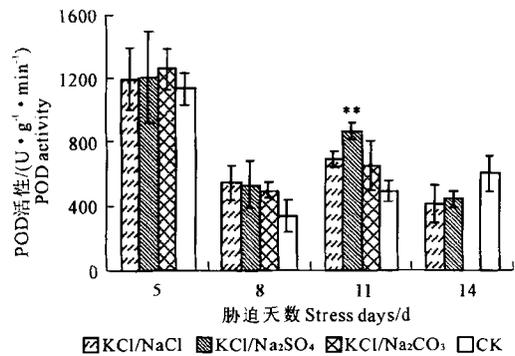


图 5 胁迫处理对蚕豆叶片 POD 活性的影响  
Fig.5 The POD activities of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

### 2.4 过氧化氢酶(CAT)活性的变化

不同盐碱处理蚕豆叶片随时间变化 CAT 活性变化见图 6。由图 6 可见,与对照相比,3 种处理的 CAT 活性增加幅度随胁迫时间延长基本呈先增加后降低趋势,其中胁迫时间 11 d 时 KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理的 CAT 活性达到最大值,分别比对照增加了 91.31%、100.66%、71.29%;胁迫时间 14 d 时 KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的 CAT 活性下降,分别是对照的 64.85%、51.95%。

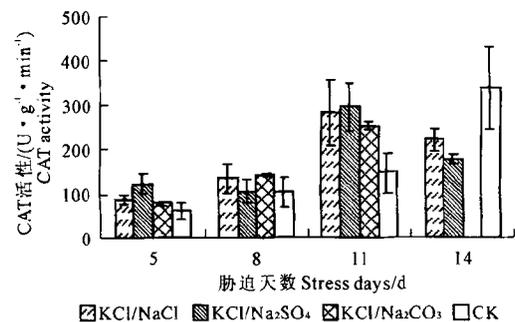


图 6 胁迫处理对蚕豆叶片 CAT 活性的影响  
Fig.6 The CAT activities of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

## 2.5 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的变化

不同盐碱处理蚕豆叶片随时间变化 APX 活性变化见图 7。由图 7 可见,与对照相比,蚕豆叶片 APX 活性随胁迫时间的延长基本呈由高到低的趋势;胁迫时间 11 d 时, KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的 APX 活性分别比对照增加了 60.86%、47.54%、89.55% ( $P < 0.05$ );胁迫时间 14 d 时, KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的 APX 活性下降,分别是对照的 64.10%、18.72% ( $P < 0.05$ )。

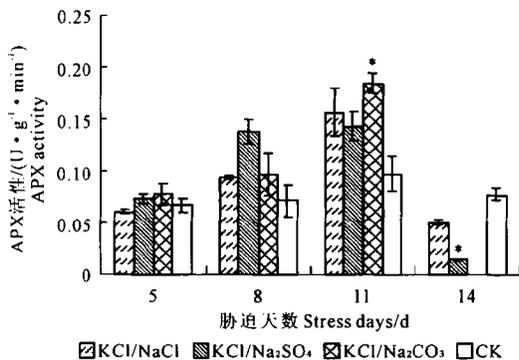


图7 胁迫处理对蚕豆叶片 APX 活性的影响

Fig.7 The APX activities of *Vicia faba* L. leaves under different stress conditions

## 3 讨论

植物体正常生理代谢活动会产生超氧阴离子自由基( $O_2^{\cdot-}$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )、羟自由基( $OH\cdot$ )、单线态氧( $^1O_2$ )等重要的活性氧自由基(ROS),这些 ROS 与其清除剂之间存在动态平衡,使植物细胞免受伤害。但是,许多逆境胁迫破坏了植物体内活性氧代谢的平衡, $O_2^{\cdot-}$ 在体内积累,SOD 催化  $O_2^{\cdot-}$ ,反应生成  $H_2O_2$ ,若  $H_2O_2$  不能被及时清除,就会生成毒性更强的羟自由基( $\cdot OH$ ),CAT、POD、APX 对清除植物体内  $H_2O_2$  起重要作用。本研究中混合胁迫处理蚕豆幼苗,蚕豆叶片中的抗氧化酶 SOD、POD、CAT、APX 活性增加幅度随胁迫时间的延长呈先升高后降低趋势,其中增加幅度 SOD 活性 > CAT 活性 > APX、POD 活性,说明蚕豆受到混合胁迫时 SOD 活性发挥首要作用,CAT 活性次之,这一结果同盛艳敏等研究结果一致<sup>[20]</sup>,即 CAT 在清除  $H_2O_2$  起重要作用<sup>[21]</sup>。抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性呈先升高后降低趋势,因为植物受逆境胁迫时,产生的活性氧自由基数量增加,为了抵抗逆境对植物造成的伤害,酶活性增加,以便清除更多的氧自由基,降低细胞膜脂过氧化<sup>[21-25]</sup>。但是随胁迫时间的延长,超过了植物的耐受极限,保护酶系统遭到破坏,活性降低。

植物在正常或适宜的环境下,依靠自身的生理代谢维持细胞的渗透平衡。当植物长时间受到盐碱胁迫时,植物膜系统被破坏,导致 MDA 和脯氨酸增加,影响和破坏了细胞的正常代谢,植物生长受到抑制甚至枯萎而死。本研究中盐碱处理连续 11 d 时, KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、KCl/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 处理的脯氨酸急剧增加,分别是对照的 5.11、2.95、3.03 倍,丙二醛含量分别是对照的 0.96、1.20、1.00 倍。处理 14 d 时, KCl/NaCl、KCl/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理的脯氨酸含量极显著增加( $P < 0.01$ ),分别是对照的 5.93、3.53 倍,丙二醛含量分别是对照的 1.42、1.48 倍。显然脯氨酸含量的增加幅度高于丙二醛的幅度,脯氨酸积累量与植物胁迫呈负相关,脯氨酸是一种重要的渗透调节物质<sup>[26-27]</sup>。

总之,4 种抗氧化物酶在不同的酸碱处理下呈现出各自的变化特点,这是和它们的作用有关的,也是协同作用的一种体现。

## 参考文献:

- [1] 刘宛,李培军,周启星,等. 氯苯类胁迫对蚕豆幼苗超氧化物歧化物活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 432-436.
- [2] 刘霞. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫对蚕豆幼苗几种生理生化指标的影响[J]. 枣庄学院学报, 2008, 25(2): 98-101.
- [3] 刘霞. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫对蚕豆幼苗生长及叶绿素含量的影响[J]. 长江蔬菜, 2010, (12): 30-32.
- [4] 武永军,曹让,王爱连,等. 不同 pH 缓冲液处理下蚕豆幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的变化[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 170-173.
- [5] 武永军,何国强,史艳茹,等. 不同 pH 值缓冲液处理下蚕豆叶片相对含水量、脯氨酸及丙二醛含量的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 169-172.
- [6] 李源,魏小红,朱蕾,等. 外源 NO 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对镉胁迫下蚕豆种子萌发及幼苗生长的保护效应[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(11): 4942-4944.
- [7] 赵丽英,李洪武,宋玉伟. 脱落酸对镉胁迫下蚕豆幼苗光合参数和抗氧化酶的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 127-131.
- [8] 苟本富. 铜胁迫对蚕豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(5): 116-120.
- [9] Arya S K, Roy B K. Manganese induced changes in growth, chlorophyll content and antioxidants activity in seedlings of broad bean (*Vicia faba* L.) [J]. J Environ Biol, 2011, 32(6): 707-711.
- [10] 钟钊芝,王丹,徐长合,等. 螯合剂对镉污染土壤中蚕豆幼苗生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 639-644.
- [11] Manzer H S, Mohamed H A, Ahmed M S, et al. Effect of calcium and potassium on antioxidant system of *Vicia faba* L. under cadmium stress [J]. Int J Mol Sci, 2012, 13(6): 6604-6619.

(下转第 193 页)

### 3 结 论

在农田盐渍化中,土壤质量随着盐渍化的发展发生一定的变化趋势。在0~20 cm土层,土壤容重随盐渍化的发展逐渐增加,土壤孔隙度降低;土壤有机质显著降低,并且0~10 cm土层降低率快于10~20 cm土层,说明土壤养分储存和供应水平趋于降低,土壤结构恶化,质量下降。

在盐渍化过程中,在不同盐渍化梯度和不同生育期,盐胁迫对作物农艺性状和产量的影响不同。对于农作物,盐渍化程度等于或高于中度盐渍化水平时,大麦植株的穗长、穗粒数和秸秆重受到显著影响;在开花、孕穗和灌浆期的盐度既会降低籽粒产量也降低秸秆产量。与农作物相比,盐渍化程度等于或高于轻度盐渍化水平时,牧草植株的株高、主侧枝长和主根直径会受到影响,进而导致牧草产量的降低。因此,在农业生产中,应根据两种作物在不同盐渍化梯度不同生育期的受害状况进行相应的水盐调控和耕作管理,以实现盐渍化农田作物产量的维持和增加。

### 参 考 文 献:

- [1] 高扬帆,吕文彦,王丙丽,等.盐胁迫对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2006,34(22):5781-5783.
  - [2] 臧波,向波,张功亚.油田次生盐渍化土对几种作物的影响[J].江汉石油科技,2006,16(4):60-65.
  - [3] 廖震,陈金湘,廖振坤.棉花耐盐性研究现状与展望[J].作物研究,2008,22(5):460-465.
  - [4] 余美,杨劲松,刘梅先,等.膜下滴灌灌水频率对土壤盐运移及棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):18-23.
  - [5] 姚宝林,叶含春,孙三民,等.微咸水滴灌土壤盐分布规律与枣树耐盐性试验研究[J].节水灌溉,2010,(10):32-39.
  - [6] Soil Survey Division Staff. Soil survey manual[M]. Washington, DC: In USDA Handbook 18, US Gov., 1993:437.
  - [7] 苏永中,赵哈林,张铜会,等.不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征[J].中国沙漠,2002,22(4):333-338.
  - [8] 徐丽恒,王继和,李毅,等.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J].中国沙漠,2008,28(4):690-695.
  - [9] 刘全友,童依平.北方农牧交错带土地利用类型对土壤养分分布的影响[J].应用生态学报,2005,16(10):1849-1852.
  - [10] Lal R. Carbon Sequestration in Drylands[J]. Annals of Arid Zone, 2000,39(1):1-10.
  - [11] 谭明亮,段争虎,陈小红.流沙地恢复过程中土壤特性演变研究[J].中国沙漠,2008,28(4):685-689.
- 
- (上接第165页)
- [12] Wang C, Luo X, Tian Y, et al. Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk[J]. Chemosphere, 2012,86(5):530-537.
  - [13] Wang C R, Xiao J J, Tian Y, et al. Antioxidant and prooxidant effects of lanthanum ions on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, suggesting ecological risk[J]. Environ Toxicol Chem, 2012,31(6):1355-1362.
  - [14] 陈志远,王国栋,鄢丽俊,等.低温冻害对蚕豆幼苗生理生化特性的影响及 RAP-PCR 指纹分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):6-12.
  - [15] 张苗苗,韩善华,王亚男,等.硒对蚕豆胚根抗氧化酶系统的影响[J].四川师范大学学报(自然科学版),2012,33(2):239-242.
  - [16] 武永军,项燕,曹让,等.干旱胁迫下蚕豆叶片抗氧化酶活性的变化[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):188-190.
  - [17] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
  - [18] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导(第三版)[M].北京:高等教育出版社,2005.
  - [19] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant Cell Physiol, 1981,22(5):867-880.
  - [20] 盛艳敏,尹金植,石德成,等.盐碱协同胁迫对向日葵抗氧化酶系统的影响[J].中国生物化学与分子生物学,2008,24(8):704-711.
  - [21] Gondim F A, Gomes-Filho E, Costa J H, et al. Catalase plays a key role in salt stress acclimation induced by hydrogen peroxide pretreatment in maize[J]. Plant Physiol Biochem., 2012,56:62-71.
  - [22] 何俊瑜,任艳芳,朱诚期,等.镉胁迫对镉敏感水稻突变体活性氧代谢及抗氧化酶活性的影响[J].生态环境,2008,17(3):1004-1008.
  - [23] 杜世章,代其林,奉斌,等.不同浓度 NaCl 胁迫处理下豇豆幼苗抗氧化酶活性的变化[J].基因组学与应用生物学,2011,30(3):351-356.
  - [24] 陈虹,张颖,方元平,等.镉对金鱼藻植株生长和抗氧化酶活性的影响[J].湖北农业科学,2012,51(5):977-980.
  - [25] 李慧,王妙媛,彭立新,等.NaCl胁迫对胡芦巴幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J].华北农学报,2012,27(2):185-188.
  - [26] Hayat S, Hayat Q, Alyemeni M N, et al. Role of proline under changing environment: A review[J]. Plant Signal Behav, 2012,7(11):1456-1466.
  - [27] 时丽冉,刘志华.干旱胁迫对苜蓿抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J].草地学报,2010,18(5):673-677.