

# Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下青海星星草种子萌发过程中淀粉酶活性等的变化

卢素锦<sup>1</sup>, 周青平<sup>2\*</sup>, 颜红波<sup>2</sup>

(1. 青海大学 生物科学系, 西宁 810016; 2. 青海畜牧兽医科学院, 西宁 810003)

**摘要:** 对 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下青海星星草种子萌发过程中淀粉酶活性、可溶性糖含量、呼吸强度的变化进行了研究。结果表明在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下, 种子萌发过程中淀粉酶活性、可溶性糖含量、呼吸强度与空白对照相比均下降, 当 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度大于 5.00% 时, 青海星星草种子在播种后至测量结束时, 淀粉酶活性、可溶性糖含量、呼吸强度几乎都没有变化, 三者与 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫浓度的负相关关系均极其显著。在播种后的 1~8 d 可溶性糖含量的变化与淀粉酶活性的变化基本趋于一致, 两者呈显著的正相关关系。第 8 天以后, 可溶性糖含量开始降低, 而淀粉酶活性继续升高, 说明可溶性糖已被利用、转化或合成新物质, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下可溶性糖含量减少主要是因为淀粉酶活性受到了抑制。水解酶活性降低、储藏物质不能动员导致其不能水解、呼吸代谢受抑制是 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下青海星星草种子萌发受抑制的主要原因。

**关键词:** 青海星星草; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫; 淀粉酶; 可溶性糖; 呼吸强度

**中图分类号:** Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2009)04-0522-05

## Change of diastase activity of *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds under sodium carbonate stress

LU Su-Jin<sup>1</sup>, ZHOU Qing-Ping<sup>2\*</sup>, YAN Hong-Bo<sup>2</sup>

(1. Department of Biological Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Academy of Animal Sciences and Veterinary Medicine, Xining 810003, China)

**Abstract:** Changes of diastase activity, soluble carbohydrate content and respiratory intensity of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds under sodium carbonate stress were studied. The results were as follows: diastase activity, soluble carbohydrate content, respiration intensity had a positive correlation with germinating process in salt free condition. When the sodium carbonate concentration was more than 5.00%, changes of diastase activity, soluble carbohydrate content and respiratory intensity of germinating *P. tenuiflora* cv. Qinghai seeds nearly did not happen, but it had a significant negative correlation with each other. Until the eighth day from being bred, changes of soluble carbohydrate content was basic the same to changes of diastase activity and had a significant negative correlation with each other. But after the eighth day, soluble carbohydrate content begin to decrease and diastase activity continue to raise, it showed that soluble carbohydrate had been used, transferred or composted to new material. Why soluble carbohydrate content decreased under sodium carbonate stress was that diastase activity had been restrained. The decrease of hydrolytic enzyme activity and inhibition of the using of storing material and the inhibition of respiration were the main reasons the *P. tenuiflora* cv. Qinghai seeds could not germinate under sodium carbonate stress.

**Key words:** *P. tenuiflora* cv. Qinghai; sodium carbonate stress; diastase; soluble carbohydrate; respiration intensity

收稿日期: 2007-12-11 修回日期: 2008-05-19

基金项目: 国家农业部项目“全国牧草种质资源保护利用”(070401)[Supported by National Ministry of Agriculture(070401)]

作者简介: 卢素锦(1969-), 女, 河北任丘人, 副教授, 主要从事环境科学研究, (E-mail)lusujin88@163.com.

\* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: qpingzh@yahoo.com.cn)

青海星星草 (*Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai) 是 1971 年在青海省同德县巴滩地区采集野生种, 经长期选育, 栽培驯化而成。属禾本科碱茅属, 多年生、早中生植物。经过多年的引种实验, 青海星星草在青海高寒地区海拔 4 000 m 以下地区均能种植, 且能安全越冬, 完成生育期。目前全球盐渍土面积不断扩大, 据估计, 全球盐渍土每年以  $(1.00 \sim 1.50) \times 10^6 \text{ hm}^2$  的速度增长, 土壤的盐渍化已成为重要的环境问题。青海盐渍化土壤面积大, 盐渍土造成了牧草根系环境渗透势的降低及高浓度  $\text{Na}^+$  等离子效应, 影响代谢调节, 引起土壤 pH 的升高, 使草原生态环境恶化。植物在盐胁迫下, 其生长发育通常会受到抑制, 国内外的许多学者对此进行了大量的研究和探讨, 并提出了“盐害假说”(Levitt, 1980; Munns, 1986, 1993; 张楠楠等, 2005)。孙国荣等(2005)和韦存虚等(2006)曾对星星草做过耐盐碱性研究, 得出了星星草在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下种子萌发、幼苗生长及细胞结构的变化, 而青海星星草在这方面的研究还是空白。若青海星星草具有较强的抗盐碱性, 则能在青海盐碱地上广泛栽培, 起到改良土壤, 降低土壤 pH 的作用。

本文对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下青海星星草种子萌发过程中淀粉酶活性、可溶性糖含量、呼吸强度变化进行了研究, 以探讨较高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下青海星星草种子萌发的生理机制, 为青海星星草在青海省大面积推广应用、广泛种植, 成为高寒地区生长的优良草种和当家品种提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

2005 年采集青海省海北州刚察县西三角城地区的青海星星草种子, 自然晾干供实验用。

### 1.2 盐溶液配制

用蒸馏水配制浓度分别为 0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%、1.75%、2.00%、2.25%、2.50%、2.75%、3.00%、4.00%、5.00%、6.00% 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液, 共 16 个浓度梯度。

### 1.3 种子培养

在 48 个洁净的培养皿中放入滤纸, 分别加入上述不同浓度的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液到滤纸饱和为止, 准确称取 0.3 g 种子均匀播种于该滤纸上, 定期补充所蒸发的水分, 使各处理盐浓度维持不变, 置于(25 ±

1)℃ 的恒温培养箱中进行培养。每 16 个培养皿为一组, 共 3 组, 分别进行不同盐浓度处理和不同天数处理, 于播种后的第 2、4、6、8、10 天取出, 进行各项生理生化指标的测定。

### 1.4 测定项目与方法

测定项目包括淀粉酶活性、可溶性糖含量、呼吸强度等项目。淀粉酶活性的测定参照孙群(1981)的方法进行(淀粉的水解产物麦芽糖与 3,5-硝基水杨酸试剂反应, 使其生成红色的 3-氨基-5-硝基水杨酸, 在一定范围内, 其颜色深浅与淀粉酶水解产物浓度成正比)。可溶性糖含量的测定参照田纪春、赵世杰、黄学林(1985)的蒽酮法进行(蒽酮法测定可溶性糖)。呼吸强度的测定参照赵令杰的滴定法(2003)进行(滴定法测定呼吸强度)。

## 2 结果与分析

### 2.1 淀粉酶活性的变化

无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 播种后第 1 天到第 6 天, 淀粉酶活性略有上升, 第 6 天后, 淀粉酶活性急速上升, 到第 10 天, 淀粉酶活性上升至最高(10 酶活性单位); 在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 随着其浓度的升高, 酶的活性逐渐减弱: 低浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 淀粉酶活性在萌发过程中出现了同无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下相类似的变化趋势, 但随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的升高, 酶活性增加速度逐渐降低;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 4.00% 时, 种子萌发过程中淀粉酶活性缓慢升高;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于 5.00% 时, 种子萌发过程中淀粉酶活性略有升高, 基本维持不变(图 1)。播种后第 7 天, 所测淀粉酶活性与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度负相关关系极其显著(图 2,  $r = -0.9254^{**}$ , 其中上标\*\*表示 0.01 水平显著)。

### 2.2 可溶性糖含量的变化

无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 青海星星草种子播种后的第 2 天至第 6 天, 可溶性糖含量缓慢增加, 第 6 天后, 可溶性糖含量急速上升, 到第 8 天达到最高峰, 随后开始下降(图 3)。青海星星草种子在播种后第 3 天已陆续有种子萌发, 说明淀粉的大规模水解是在种子萌发以后。低浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 青海星星草种子可溶性糖含量的变化与对照呈现出同样的趋势, 即刚开始时缓慢增加, 随后急速上升, 但随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的不断增大, 可溶性糖含量的高峰随之下降, 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 4.00% 时, 青海星星草种子的可溶性糖含量在第 8 天达 33 mg/g, 与种子

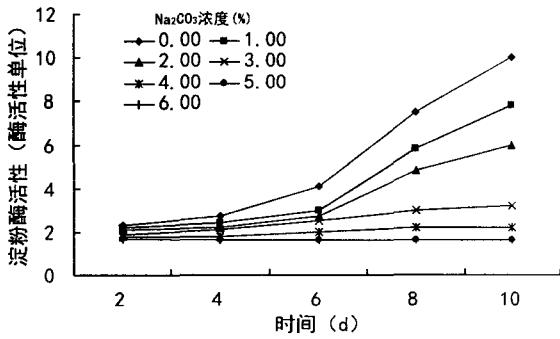


图 1  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对青海星星草种子萌发过程中淀粉酶活性的影响

Fig. 1 Effects of sodium carbonate stress on diastase activity of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds

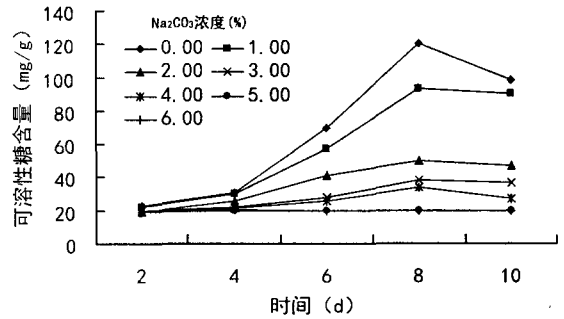


图 3  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对青海星星草种子萌发过程中可溶性糖含量的影响

Fig. 3 Effects of sodium carbonate stress on soluble carbohydrate content of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds

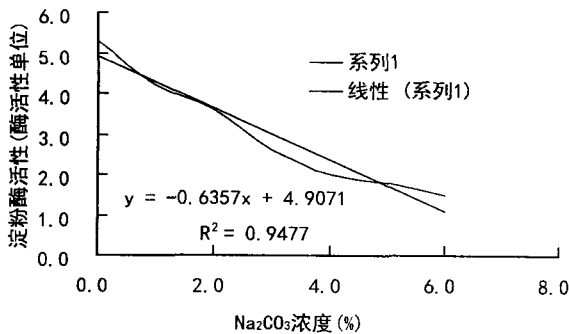


图 2 青海星星草种子萌发过程中淀粉酶活性与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的关系

Fig. 2 Correlation between diastase activity of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds and sodium carbonate concentration

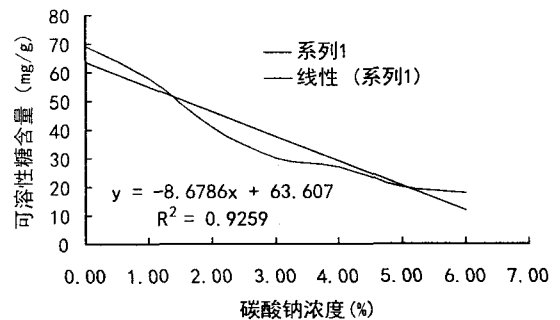


图 4 青海星星草种子萌发过程中可溶性糖含量与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的关系

Fig. 4 Correlation between soluble carbohydrate content of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds and sodium carbonate concentration

刚萌发时变化不大(种子萌发的第 1 天为 20 mg/g)。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于 5.00% 时,青海星星草种子在播种后至测量结束时,可溶性糖含量几乎无变化(图 3),说明在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,淀粉水解受阻。播种后的第 7 天,所测可溶性糖含量和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度负相关关系及其显著(图 4,  $r = -0.9113^{**}$ )。

上述结果显示,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,青海星星草种子萌发过程中,可溶性糖含量和淀粉酶活性的变化趋势基本同步,但第 8 天后,可溶性糖含量开始降低,而淀粉酶活性继续升高,说明可溶性糖已被利用、转化或合成新物质,播种后第 7 天所测不同浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下可溶性糖含量与淀粉酶活性正相关关系极其显著( $r = 0.9839^{**}$ ),说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下可溶性糖含量减少主要是因为淀粉酶活性受到了抑制。

### 2.3 对呼吸强度的影响

无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,青海星星草种子呼吸作用

的变化可为 3 个阶段(图 5):第一阶段从种子吸涨开始,呼吸作用迅速增加并保持至第 2 天。随后,出现滞缓期,呼吸强度缓慢增加,并逐渐趋于平稳(第二阶段)。滞缓期的出现很可能的原因是受种皮的限制缺氧所致。种子萌发第 5 天以后,胚根出现,呼吸作用再次增强(第三阶段)。较低浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,呼吸作用变化趋势相同,但呼吸强度随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增大而明显降低;较高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,种子在萌发 24 h 之内,呼吸作用迅速增加,但呼吸强度随浓度的增大而降低,24 h 后,呼吸强度缓慢增加,没有明显的第三阶段,而  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于 5.00% 时,呼吸作用在 24 h 后基本稳定,种子不萌发,也没有第三阶段。正常情况下及  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,种子萌发过程中呼吸强度的变化与种子含水量的变化基本同步。种子萌发第 7 天呼吸作用  $\text{CO}_2$  的释放量与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度之间的负相关关系及其显著( $r = 0.9254$ ),说明在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,其呼

吸作用受到阻碍(图 6)。

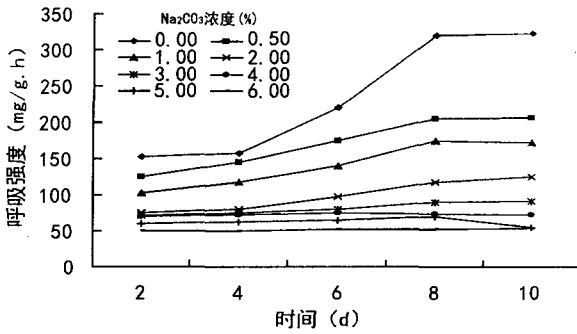


图 5  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对青海星星草种子萌发过程中呼吸强度的影响

Fig. 5 Effects of sodium carbonate stress on respiration intensity of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds

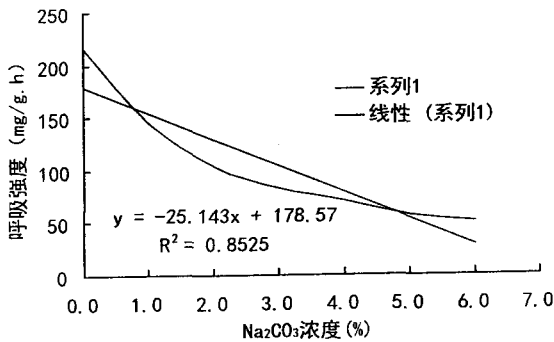


图 6 青海星星草种子萌发过程中呼吸强度与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的关系

Fig. 6 Correlation between respiration intensity of germinating *Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai seeds and sodium carbonate concentration

### 3 讨论与结论

种子萌发过程中所需要的养料和能量主要来自自身储存的营养物质,这些物质在种子萌发时水解成简单的营养物质,并转运到生长部位,为生长部位的生长提供能量(金兰,2003,石德成,2002)。淀粉是青海星星草种子主要的储藏物质,在其萌发过程中,可溶性糖含量的大规模增加和淀粉酶活性的提高基本上是同步的,说明淀粉酶活性的提高促进了淀粉转化为可溶性糖。随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度的增加,淀粉酶活性、可溶性糖含量均下降。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度大于 5.00% 时,种子不能萌发,淀粉酶活性、可溶性糖含量几乎无变化,说明淀粉酶活性降低,未能使可溶性糖水解,可溶性糖不能及时地吸收利用,从而影响了种子的萌发。储藏物质不能动员,是

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  抑制青海星星草种子萌发的主要原因之一;此外  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,导致种子周围处于较高的渗透势,使种子细胞内外的水势差降低(石德成等,2002;王建波等,2006),水分吸收受到阻碍,淀粉等储藏物质不能水解,使细胞内可溶性的物质减少,抑制了细胞内正常的代谢活动如物质的运输、转化、吸收、酶的活化等,使种子萌发受阻。

干种子吸水后的呼吸作用是种子萌发成长为幼苗的前提。因为只有通过呼吸作用,原来储藏在种子中的养分才能完成转化过程而被动员,才能用于构建新的细胞、组织和器官。而且呼吸作用通过对基质物质的氧化,为幼苗的形态建成提供不可缺少的能量供应。青海星星草种子萌发过程中,呼吸强度的变化与种子吸水的变化趋势基本一致。闫先喜等(1994)的研究结果表明,2%  $\text{NaCl}$  胁迫下细胞内线粒体修复会受阻,脊膜不完善。在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,种子萌发过程中,线粒体膜修复受阻,膜透性增大(高红明等,2006),从而抑制青海星星草的呼吸作用;此外  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下,主要储藏物质淀粉水解受到阻碍,呼吸底物减少,也是青海星星草种子呼吸强度下降的原因。

孙国荣等(1999)对星星草种子萌发过程中几项生理、生化指标进行了测定,其研究结果基本与青海星星草一致。当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度大于 5.00% 时,其可溶性糖含量为 15 mg/g,淀粉酶活性为 1.5,其呼吸强度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而对青海青青草的研究结果表明,当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫浓度大于 5.00% 时,其可溶性糖含量可达到 20 mg/g,淀粉酶活性可达到 1.8,呼吸强度可以达到  $60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,淀粉酶活性的增强促使淀粉水解为可溶性糖,及时构建新的细胞、组织和器官,通过呼吸作用也为幼苗的形态建成提供了充足的能量,这些加快了青海星星草种子萌发长成幼苗。从以上分析可以看出青海星星草具有较强的耐盐碱性。

青海的盐渍土主要集中在柴达木盆地和青海湖环湖地区,目前青海省牧科院的专家已在柴达木盆地和青海湖环湖地区进行着 3  $\text{hm}^2$  的引种栽培实验,青海星星草生长健壮,长势良好,有望成为高寒地区生长的优良草种和当家品种,为改善青海的生态环境做出贡献。

### 参考文献:

上海植物生理学汇编. 1985. 植物生理学试验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 50-55

- 黄学林. 1985. 种子生理学试验手册[M]. 北京: 农业出版社, 20—23
- 张志良, 翟伟菁. 2003. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 50—60
- 邹奇. 2003. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 100—105.
- Gao HM(高红明), Wu XX(吴晓霞), Zhang B(张彪). 2006. The change of defensive enzymes and active oxygen of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下星星草幼苗活性氧及保护酶活性的变化)[J]. *Bull Bot* (植物研究), 13(6): 87—91
- Jin L(金兰), Ding L(丁莉). 2003. Changes of diastase activity and soluble carbohydrate content of germinating *Puccinellia tenuiflora* seeds under sodium carbonate stress(盐胁迫下星星草种子萌发过程中淀粉酶活性及可溶性糖含量变化)[J]. *J Qinghai Norm Univ* (青海师范大学学报), 2(5): 61—63
- Levitt J. 1980. Responses of plants to environmental stress Vol II 2nded[J]. *New York: Academic Press*, 5: 99—100
- Munns RA. 1986. Whole-plant responses to salinity[J]. *Aust J Plant Physiol*, 13: 143—160
- Munns R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses[J]. *Plant Cell Environ*, 16: 152—241
- Shi DC(石德成), Ying SJ(尹尚君), Yang GH(杨国会). 2002. Citric acid accumulation in an alkali-tolerant plant *Puccinellia tenuiflora* under alkaline stress(碱胁迫下耐碱植物星星草体内柠檬酸特异积累现象)(英)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 5(12): 112—115
- Sun GR(孙国荣), Wang JB(王建波), Cao WZ(曹文钟), et al. 2005. GST activity and its related indexes in the chloroplasts of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下星星草幼苗叶绿体 GST 活性变化及其与相关指标的关系)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), 25(12): 2 495—2 501
- Sun GR(孙国荣), Chen YY(陈月艳), Yan XF(阎秀峰). 1999. Changes of diastase activity, soluble carbohydrate content and respiratory intensity of germinating *Puccinellia tenuiflora* seeds under sodium carbonate stress(盐碱胁迫下星星草种子萌发过程中有机物, 呼吸作用及酶活性的变化)[J]. *Bull Bot* (植物研究), 10(4): 445—451
- Wang JB(王建波), Song GR(孙国荣), Chen G(陈刚). 2006. The relationship between light energy utilization and dissipation of PSII of *Puccinellia tenuiflora* seedlings and osmotic potential of culture solution under  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下星星草幼苗叶片 PSII 光能利用和耗散与培养基质渗透势的关系)[J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1(1): 115—121
- Wei CX(韦存虚), Wang JX(王建军), Wang JB(王建波). 2006. Effects of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress on the ultrastructure of mesophyll cells in *Puccinellia tenuiflora* ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对星星草叶肉细胞超微结构的影响)[J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1(1): 108—114
- Wei CX(韦存虚), Zhang J(张军), Wang JX(王建军). 2006. Observation on structural characters of vegetative organs of *Puccinellia tenuiflora* under salt stress (星星草营养器官适应盐胁迫的结构特征)[J]. *J Plant Res Environ* (植物资源与环境学报), 15(1): 51—56
- Yan XX(阎先喜). 1994. The effect of the membrane in wheat germ under salt stress (盐胁迫对小麦胚根系细胞膜系统的影响)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 36(增刊): 33—36
- Zhang NN(张楠楠), Xu XL(徐香玲). 2005. The study of the mechanism which the plants resist the salt(植物抗盐机理的研究)[J]. *J Harbin Norm Univ(Nat Sci Edi)* (哈尔滨师范大学·自然科学版), 21(1): 65—68

(上接第 505 页 Continue from page 505)

- Shi GX(施国新), Du KH(杜开和), Xie KB(解凯彬), et al. 2000. Ultrastructural study of leaf cells damaged from  $\text{Hg}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  pollution in hydrilla verticillata(汞, 镉污染对黑藻叶细胞伤害的超微结构研究)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 42(4): 373—378
- Sugiyama M. 1994. Pole of cellular antioxidants in metal-induced damage[J]. *Cell Biol Toxicol*, 10: 1—22
- Tan (谭茂玉), Shen FF(沈法富). 2006. The regulation and test on plant programmed cell death(植物细胞程序性死亡的调控及检测)[J]. *J Taishan Univ* (泰山学院学报), 28(3): 79—83
- Trevor EK, Fletcher RA. 1994. Paclobutrazd protects wheat seedlings from heat and paraquat injury. Is detoxification of active oxygen involved? [J]. *Plant Cell Physiol*, 1: 45—52
- Wijmsman JH, Jonker RR, Keijzer R, et al. 1993. A new method to detect apoptosis in paraffin sections: in situ End-labeling of fragmented DNA[J]. *Histochem Cytochem*, 41: 7—12
- Wu YY(吴燕玉), Wang X(王新), Liang RL(梁仁禄), et al. 1997. Ecological effect of compound pollution of heavy metals in soil plant system II. Effect on element uptake by crops, alfalfa and tree(重金属复合污染对土壤—植物系统的生态效应 II. 对作物、苜蓿、树木吸收元素的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 8(5): 79—83
- Xia HL(夏慧莉), Chen HM(陈浩明), Wu Y(吴逸), et al. 1999. Hydroxyl radicals induce apoptosis of tobacco cells(羟自由基诱导烟草细胞凋亡)[J]. *Acta Photophysiol Sin* (植物生理学报), 25(4): 339—342
- Yu WH(于维华), Chen P(陈鹏), WANG Li(王莉), et al. 2004. Advances in studies on programmed cell death (PCD) in plants (植物细胞程序性死亡(PCD)的研究进展)[J]. *Guihaia* (广西植物), 24(2): 146—151
- Zeng ZH(曾昭惠), Zhang ZY(张宗玉). 1995. The oxidative damage of mitochondrial DNA by free radicals and aging(自由基对线粒体 DNA 的氧化损伤与衰老)[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics* (生物化学与生物物理进展), 22(5): 429—432
- Zhai QW(翟琦巍), Ji HB(季红斌), Zhen ZC(郑仲承), et al. 2000. A novel type of apoptosis induced by cadmium in BA/F3 $\beta$  cells(镉离子诱导 BA/F3 $\beta$  细胞发生奇特的细胞凋亡)[J]. *Acta Biochemica Biophysica Sin* (生物化学与生物物理学报), 32(1): 77—80
- Zhang YX(张玉秀), Chai TY(柴团耀), Gerard Burkard. 1999. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants(植物耐重金属机理研究进展)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 41(5): 453—457