

抗坏血酸对镉胁迫下油菜幼苗生长的影响

张 佩, 周 琴, 孙小芳, 王福政, 江海东

(南京农业大学作物生长调控农业部重点开放实验室, 江苏 南京 210095)

摘 要:采用网室水培试验方法,研究了高频次(2 d 1 次,共 5 次)条件下不同浓度的抗坏血酸(0.1、1.0、2.5、5.0 mmol·L⁻¹)对油菜幼苗镉胁迫的缓解效应。结果表明,25 mg·L⁻¹ CdCl₂·2.5H₂O 溶液对油菜幼苗造成了明显的伤害,抑制了油菜幼苗的生长,叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量以及 SOD、POD、CAT 酶活性下降,而丙二醛含量上升。向油菜幼苗叶表面喷施不同浓度的抗坏血酸后,低浓度的抗坏血酸(0.1 mmol·L⁻¹ AsA)对 Cd 胁迫有较好的缓解作用,0.1 mmol·L⁻¹ 的抗坏血酸处理下,油菜生物量、叶片中叶绿素、类胡萝卜素含量以及 SOD、POD、CAT 酶活性显著增加,丙二醛含量降低,地下部单位质量镉含量、单株地下部镉积累量以及单株地上部镉积累量升高,地上部单位质量镉含量下降;而高浓度处理的抗坏血酸对油菜幼苗不但没有明显缓解作用,反而对叶片有一定的伤害。

关键词:抗坏血酸;油菜;镉胁迫;缓解

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2362-05

The Alleviative Effects of AsA on the Growth of Rape Seedlings Under Cd Stress

ZHANG Pei, ZHOU Qin, SUN Xiao-fang, WANG Fu-zheng, JIANG Hai-dong

(MOA Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Cd can damage plant to accumulate active oxygen in plant tissue. The accumulation of active oxygen is due to the unbalance between the production and elimination of active oxygen in plant tissue, which causes the lipid peroxidation of plant cell membrane, and damages the plants. Alleviative effects of different concentration (0.1, 1.0, 2.5, 5.0 mmol·L⁻¹) Ascorbic acid (AsA) on rape seedlings treated by 25 mg·L⁻¹ CdCl₂·2.5H₂O were studied. 2 days after Cd treatment, AsA was applied 5 times at the intervals of 2 days. Results showed that the 25 mg·L⁻¹ CdCl₂·2.5H₂O treatment inhibited the growth of seedlings and caused a significant increase in malondialdehyde (MDA) content which was the product of lipid peroxidation. Significant increase of lipid peroxidation degree in the rape seedlings was mainly due to the decrease in the capability of protective enzymes to eliminate base oxygenic ions. Cd stress decreased the activities of the superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD), contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid in the seedling leaf. With the application of different concentration of ASA, it showed that low concentration AsA could alleviate Cd stress of rape seedlings effectively. 0.1 mmol·L⁻¹ AsA enhanced the biomass, chlorophyll and carotenoid contents. Also the activities of antioxidant enzymes SOD, CAT and POD were increased significantly, which could eliminate base oxygenic ions in time and restrained lipid peroxidation in the rape seedlings under Cd stress. The transportation of Cd from root to shoot was obviously suppressed. Cd content and Cd accumulation in root, Cd accumulation in shoot increased, while Cd content in shoot decreased significantly. It suggested that 0.1 mmol·L⁻¹ AsA had good alleviative effects on Cd intimidation, but too high concentration of AsA (2.5, 5.0 mmol·L⁻¹) and applying frequency did some damage to rape seedlings, instead.

Keywords: AsA; rape seedling; Cd stress; alleviation

镉(Cd)是一种对人类和植物都有毒害作用的重金属。它对植物具有很强的生理毒害作用,影响植物光合作用、呼吸作用及氮同化作用等,抑制植物生长,严重时甚至导致植株死亡^[1]。据统计,至 20 世纪 90 年

代初,中国镉污染耕地面积已达 1.3×10⁴ hm²,涉及 11 个省市的 25 个地区^[2],而且还有上升趋势,主要农作物将不可避免地在镉污染的农田上种植。关于镉对水稻、小麦和大麦生长的影响,前人已有部分研究^[3]。油菜(*Brassica napus*)是我国重要的经济作物,也是惟一的冬季油料作物,在我国种植业中占有重大比例。因此,明确镉对油菜生长的影响及探讨缓解镉胁迫的途径具有重要意义。

抗坏血酸(AsA)是植物体内一种重要的小分子

收稿日期:2008-01-02

基金项目:国家“十一五”支撑计划(2006BAD02A15)

作者简介:张 佩(1984—),女,安徽人,硕士,主要从事作物逆境生理研究。E-mail:ZP19840207@yahoo.com

通讯作者:江海东 E-mail:hdjiang@njau.edu.cn

抗氧化物,它可以在抗坏血酸过氧化物酶(APX)的催化作用下或本身直接与 H_2O_2 反应,在被氧化成脱氢抗坏血酸(DHA)的同时,将 H_2O_2 还原为 H_2O ,从而减轻氧化胁迫伤害^[4-5]。由于抗坏血酸所具有的特殊生理功能,很多学者已开始研究用其来缓解植物各种逆境胁迫,并取得了一些效果^[6-7]。由于 Cd 胁迫可诱导活性氧产生并使植株出现氧化损伤症状,由此认为其毒害效应与植株体内氧化剂水平有关^[8]。因此,清除活性氧及提高清除活性氧酶类的活性能够一定程度上缓解镉毒害。许丙军等^[9]研究显示 AsA 能有效缓解镉对黑藻的毒害。因此本试验通过向镉处理的油菜叶面喷施不同浓度的 AsA,探讨了镉对油菜幼苗伤害机理和油菜幼苗缓解镉胁迫的技术途径。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

供试油菜品种为秦优七号(*B. napus* var. Qinyou No.7)。抗坏血酸(L-Ascorbic acid)为分析纯。镉源为分析纯氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)。营养液采用 Hoagland 营养液配方。

1.2 试验设计

试验于 2006 年 4 月在南京农业大学网室进行,采用水培方式。将油菜种子用蒸馏水浸 6 h,然后播于沙池中,待第一片真叶露心后选长势好且一致的幼苗移栽到盛有营养液的周转箱(24.5 cm×35.5 cm)里,每箱 30 株。每 2 d 更换营养液,第 1~6 d 为 1/4 Hoagland 培养液,第 7~12 d 为 1/2 Hoagland 培养液,第 13 d 以后为全 Hoagland 培养液。第 18 d 用 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 进行处理(镉浓度由预备试验得到),镉处理 2 d 后喷施不同浓度的抗坏血酸,每两天喷一次,共喷 5 次。试验共设 6 个处理: T_1 (空白对照), T_2 ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$), T_3 ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} + 0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ AsA}$), T_4 ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} + 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ AsA}$), T_5 ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} + 2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ AsA}$), T_6 ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} + 5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ AsA}$),每个处理 3 个重复。镉处理培养 18 d 后取样测定。每天定时通气,调节 pH 值在 5.5~6.5 之间。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 油菜幼苗生物量

取样 15 株,分地上部和地下部,称重后 105°C 杀青半小时, 80°C 烘干至恒重后称干重。

1.3.2 叶绿素和类胡萝卜素含量

参照张宪政^[10]方法。取鲜叶 0.1 g,剪碎后加入 10

mL 溶液(无水乙醇:丙酮=1),放于黑暗处浸提 6~10 h,不超过 12 h,然后分光光度计分别测量 OD_{645} 、 OD_{663} 、 OD_{470} 值,计算叶绿素和类胡萝卜素含量。

1.3.3 丙二醛(MDA)含量

MDA 含量测定采用赵世杰等改进方法^[11]。

1.3.4 抗氧化保护酶的测定

SOD 活性采用 NBT 法^[12],SOD 活性单位以抑制光化还原的 50%为一个酶活性单位表示;POD 活力采用愈创木酚法^[13],以每分钟内 A_{470} 变化 0.01 为一个过氧化物酶活性单位(U);CAT 活力采用 Chance 法^[14],以每分钟内 A_{240} 变化 0.01 为一个过氧化氢酶活性单位(U)。

1.3.5 植株镉含量的测定

原子吸收分光光度计法^[15]。称取植株干样 0.3 g,加入浓硝酸和高氯酸混合液,放入消煮炉,逐级升温至 190°C ,消煮至样品发白,加入 5%硝酸溶解并定容,利用原子吸收分光光度计测定。

叶绿素和类胡萝卜素,丙二醛和抗氧化保护酶的测定均取同一叶位鲜叶片测定。

1.4 数据统计

实验中数据均采用 SAS 统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗生物量的影响

从表 1 可以看出, T_2 的单株干重和地上部干重较无镉(T_1)处理分别下降了 14.16%和 17.19%($P<0.05$),地下部干重略有下降。喷施不同浓度的抗坏血酸后, T_3 的单株干重和地上部干重较 T_2 处理增加($P<0.05$),增加幅度分别为 36.97%和 47.40%,地下部干重略有增加。随着抗坏血酸喷施浓度的提高,干物重均呈下降的趋势, T_4 的单株干重和地上部干重较 T_2 处理增加了 4.26%和 5.88%($P<0.05$), T_5 的单株干重和地上部干重维持在与 T_2 处理相当的水平, T_6 的单株干重和地上部干重比 T_2 处理有所下降。 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 处理的地下部干重与 T_2 处理相比均无显著变化。

2.2 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗叶绿素、类胡萝卜素含量的影响

叶绿素是植物光合作用的物质基础,从表 1 可以看出,与 T_1 相比, T_2 处理的油菜幼苗叶片的叶绿素 a、b 以及类胡萝卜素均下降($P<0.05$),下降幅度分别为 60.89%、73.30%和 50.21%。 T_3 处理的油菜叶片叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均较 T_2 增加($P<0.05$),其中,叶绿素 a 增加了 117.83%,叶绿素 b 增加了

168.87%,类胡萝卜素增加了 106.72%。随着抗坏血酸喷施浓度的增大,3 种色素含量越来越少。

2.3 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗镉积累的影响

油菜幼苗对培养液中镉的吸收富集能力较强,在含镉培养液中培养一段时间后,其地上部和根系中镉含量均较无镉处理显著提高(表 2),各镉处理幼苗地上部镉平均含量是无镉处理的 11.6 倍 ($P<0.05$),地下部镉含量则达到 91.1 倍($P<0.05$)。

喷施抗坏血酸后, T_3 的地下部镉含量和单株地下部镉吸收量分别比 T_2 处理增加了 10.30%和 12.82% ($P<0.05$),同时单株地上部镉吸收量也增加了 10.31%($P<0.05$),而地上部单位质量镉含量则下降了 25.17%($P<0.05$)。随抗坏血酸浓度升高,地下部镉含量、单株地下部镉吸收量和单株地上部镉吸收量逐渐下降,而地上部镉含量逐渐上升。

2.4 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗叶片抗氧化酶的影响

由图 1、图 2、图 3 可见, T_2 处理的油菜的 SOD、POD、CAT 活性均较无镉处理下降,其中,SOD 和 CAT 活性分别下降了 19.35%和 20.13%,达显著水平 ($P<0.05$)。可见 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉处理对油菜抗氧化酶系统有破坏作用。

喷施抗坏血酸后, T_3 的 SOD、POD、CAT 活性分别

比 T_2 提高了 18.72%、57.87%和 30.00%($P<0.05$)。其中 POD、CAT 活性比对照 T_1 还高。随着 AsA 浓度的升高, T_4 、 T_5 、 T_6 的 SOD 活性较 T_2 都有显著的上升,且三者与 T_3 间差异不显著; T_4 的 POD 活性高于 T_2 ($P<0.05$),但较 T_3 低($P<0.05$), T_5 、 T_6 的 POD 活性维持在与 T_3 相当水平; T_4 、 T_5 、 T_6 CAT 活性与 T_2 间没有显著差异,均显著低于 T_3 。

2.5 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗叶片丙二醛含量的影响

由图 4 可以看出, $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}(\text{T}_2)$ 处理的油菜幼苗叶细胞内丙二醛含量明显升高,比无镉处理提高了 9.74%($P<0.05$)。喷施抗坏血酸后发现, $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 抗坏血酸(T_3)处理丙二醛下降幅度最大,比 T_2 处理减少了 9.67%。随着抗坏血酸浓度的继续升高,油菜幼苗叶细胞内丙二醛含量增多, T_5 、 T_6 处理比 T_2 增加了 10.85%和 18.06%,可见 2.5 、 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的抗坏血酸对油菜幼苗不但没有缓解作用,其对油菜幼苗叶片还有一定的伤害,从而导致 MDA 量的升高。

3 讨论

当植物受到镉毒害达到一定程度时,植物就会表现出中毒性状,出现生长迟缓、植株矮小、退绿、叶

表 1 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗生物量和色素含量的影响
Table 1 Effects of L-Ascorbic acid on biomass and pigment of Cd treated rape seedlings

处理 Treatment	单株干重 Plant DW/g·plant ⁻¹	地上部干重 Shoot DW/g·plant ⁻¹	地下部干重 Root DW/g·plant ⁻¹	叶绿素 a 含量 Chla contents/mg·g ⁻¹	叶绿素 b 含量 Chlb contents/mg·g ⁻¹	类胡萝卜素含量 Car contents/mg·g ⁻¹
T ₁	0.438b	0.349b	0.089a	1.061a	0.397a	0.239b
T ₂	0.376d	0.289de	0.087ab	0.415f	0.106f	0.119de
T ₃	0.515a	0.426a	0.089a	0.904b	0.285b	0.246a
T ₄	0.392c	0.306c	0.086bc	0.522c	0.156c	0.134c
T ₅	0.375de	0.290d	0.085bcd	0.513cd	0.140cd	0.121d
T ₆	0.364f	0.279e	0.085bcd	0.466e	0.117e	0.111ef

注:a、b、c 表示差异达到显著水平($\alpha=0.05$),下同。
Note:Those marked with a,b,c indicate significant difference at 5% probability level. The same as below.

表 2 镉胁迫下抗坏血酸对油菜幼苗镉分配的影响
Table 2 Effects of L-Ascorbic acid on Cd distribution of Cd treated rape seedlings

处理 Treatment	地下部镉含量 Cd content in root/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	地上部镉含量 Cd content in shoot/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	地下部镉积累量 Cd accumulation in root / $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$	地上部镉积累量 Cd accumulation in shoot/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$
T ₁	78e	29.8f	7.0d	10.4e
T ₂	7 125bc	345.7a	619.9b	99.9b
T ₃	7 859a	258.7de	699.4a	110.2a
T ₄	7 193b	277.7d	618.6b	85.0cd
T ₅	7 084c	291.9bc	602.1bc	84.7cd
T ₆	7 035cd	318.8b	598.0c	88.9c

片发黄等症状^[16]。本试验结果也显示,25 mg·L⁻¹ CdCl₂·2.5H₂O 处理下,油菜镉积累量明显提高,地上部和地下部镉含量分别是无镉处理的 11.6 和 91.1 倍,幼苗生长受到抑制,其生物量显著低于无镉处理,且对地上部的影响要大于地下部。Cd 还可诱导植物组织产生活性氧,这是镉对植物造成伤害的一个重要方面^[17]。25 mg·L⁻¹ CdCl₂·2.5H₂O 处理使油菜抗氧化酶(SOD、CAT、POD)保护系统受损,活性下降(图 1、2、3),内源非酶类抗氧化剂——类胡萝卜素合成受

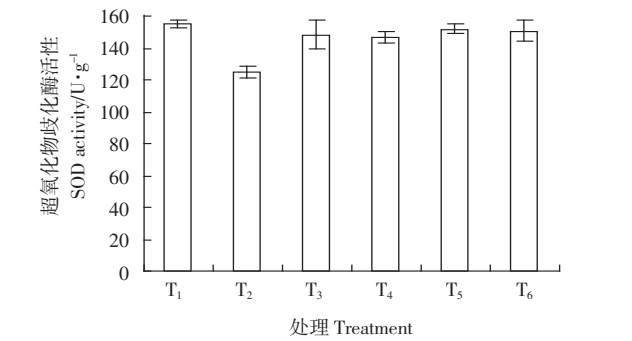


图 1 镉伤害下抗坏血酸对油菜幼苗叶片 SOD 活性的影响
Figure 1 Effects of L-Ascorbic acid on SOD activity in leaf of rape seedlings treated by Cd

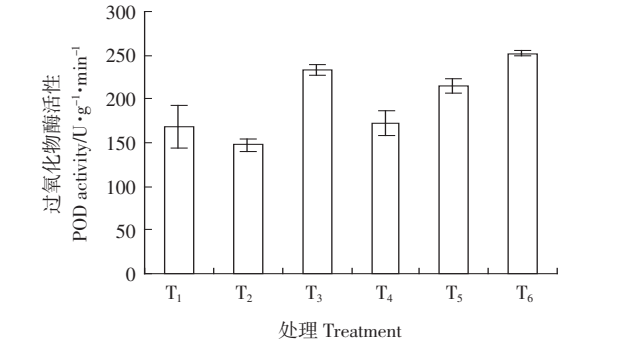


图 2 镉伤害下抗坏血酸对油菜幼苗叶片 POD 活性的影响
Figure 2 Effects of L-Ascorbic acid on POD activity in leaf of rape seedlings treated by Cd

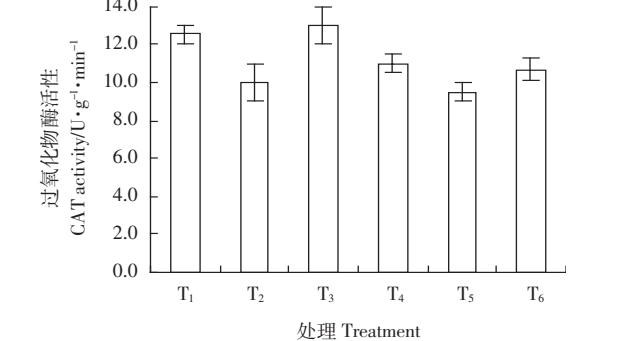


图 3 镉伤害下抗坏血酸对油菜幼苗叶片 CAT 活性的影响
Figure 3 Effects of L-Ascorbic acid on CAT activity in leaf of rape seedlings treated by Cd

阻(表 1),幼苗体内活性氧的产生速度超过了系统的清除能力,从而产生伤害,致使膜脂过氧化产物 MDA 的大量生成(图 4)。

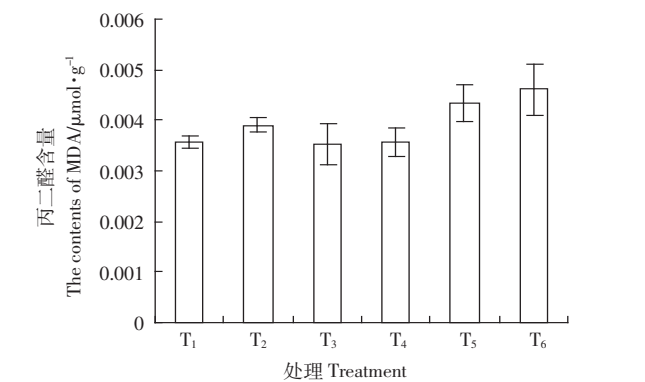


图 4 镉伤害下抗坏血酸对油菜幼苗叶片 MDA 含量的影响
Figure 4 Effects of L-Ascorbic acid on the contents of MDA in leaf of rape seedlings treated by Cd

限制植物对镉的吸收,会降低植株体内镉浓度,提高对镉的抗性。如对镉耐性较强的小麦体内积累的镉较少,而耐性较弱的菜豆体内积累的镉相对较多^[18]。植物根系细胞壁能对经过的镉离子产生吸收、固定作用。以硬粒小麦近等基因系为材料的研究发现,子粒中镉含量低的品种,根部对镉的保持力远远大于子粒镉含量高的品种^[19]。有研究显示细胞内一些化合物如谷胱甘肽、草酸和柠檬酸等物质可与镉形成沉淀降低自由态镉,一定程度上使一些物质代谢过程免受镉毒害^[20]。本研究结果也显示一定浓度的抗坏血酸处理使油菜幼苗根系镉含量显著高于未喷施处理,而地上部含量则显著低于未喷施处理,这可能是因为抗坏血酸的施用,使还原型谷胱甘肽(GSH)维持在较高的水平^[9],GSH 可能与进入根系细胞的镉发生反应,螯合了部分镉,从而减少了镉向地上部输送,部分程度上缓解了油菜幼苗的镉胁迫。同时 AsA 是抗氧化剂,可清除镉胁迫产生的活性氧,改善了植株生长发育状况,使地上部生物量、叶绿素含量、抗氧化酶类活性均显著高于未喷施 AsA 的处理。因此,虽然 T₃ 处理的 Cd 含量低于其他有镉处理,但是由于生物量较大,因此镉的积累量也较大,这就为应用油菜进行生态修复提供了可能。本试验中,空白对照的地上部镉含量达到 29.8 μg·g⁻¹,这可能是因为本试验采用的水培方式,用来配置 Hoagland 营养液的相关药品中镉的含量超标,如很多厂家生产的硫酸锌中镉都严重超标。

但 AsA 浓度过高,再加上施用频度大,使得植株吸收的 AsA 总量过大,从而产生伤害作用。本研究中

T₅、T₆ 处理的油菜叶片上能观察到明显的灼伤斑点,这可能是因为高浓度的 AsA 表现出与 Cd 的协同促氧化作用^[2],加重了对油菜幼苗的毒害作用,使植物细胞产生更多的活性氧,从而导致 MDA 含量显著上升。植物为维持活性氧处于正常水平而进行自我调节,使 SOD、POD 活性增强^[9],这可能就是 T₄、T₅、T₆ 中抗氧化保护系统酶类活性维持在较高水平的原因所在。

综合来看,一定浓度的抗坏血酸处理可改善油菜生长状况,提高油菜对镉的耐性,降低地上部镉含量,提高农产品的安全性,增强油菜生态修复效应。在多次喷施的情况下,适宜的浓度为 0.1 mmol·L⁻¹。而低频率喷施的适宜浓度则有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 贺迪,刘云国,黄玉娥,等. 钙对不同浓度镉胁迫下芦苇幼苗叶绿素及抗氧化系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 197-201.
HE Di, LIU Yun-guo, HUANG Yu-e, et al. Effects of calcium on chlorophyll and antioxidant enzymes in *Phragmites australis* under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 197-201.
- [2] 纪雄辉,梁永超,鲁艳红,等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [3] 黄秋蝉,黎晓峰,沈方科,等. 硅对水稻幼苗镉的解毒作用及其机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1307-1311.
HUANG Qiu-chan, LI Xiao-feng, SHEN Fang-ke, et al. Cadmium resistance improved by silicon and corresponding mechanisms in *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1307-1311.
- [4] Arrigoni O, Calabrese G, De Gara L, et al. Correlation between changes in cell ascorbate and growth of *Lupinus albus* seedlings[J]. *J Plant Physiol*, 1997, 150: 302-308.
- [5] De Tullio M C, Paciolla C, Della Vecchia F, et al. Changes in onion root development induced by the inhibition of peptidyl prolyl hydroxylase and influence of the ascorbate system on the cell division and elongation[J]. *Planta*, 1999, 209: 424-434.
- [6] 黄文敏,邢伟,李敦海,等. 外源抗坏血酸对烟草细胞生长及衰老的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1157-1161.
HUANG Wen-min, XING Wei, LI Dun-hai, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on the growth and senescence of tobacco BY-2 suspension cells[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1157-1161.
- [7] 郑启伟,王效科,谢居清,等. 外源抗坏血酸对臭草胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1131-1137.
ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, XIE Ju-qing, et al. Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in situ rice leaves under O₃ stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1131-1137.

- [8] Salt D, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in indian mustard[J]. *Plant Physiol*, 1995, 109: 1427-1433.
- [9] 许丙军,施国新,徐勤松,等. 外源抗坏血酸对镉胁迫下黑藻抗氧化系统的保护作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1768-1770.
XU Bing-jun, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Protective effects of exogenous ascorbic acid on antioxidant system in *Hydrilla verticillata* under Cd²⁺ stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1768-1770.
- [10] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989.
ZHANG Xian-zheng. Technology of plant physiology[M]. Shenyang: Liaoning Science Technology Press, 1989.
- [11] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
ZHAO Shi-jie, XU Chang-cheng, ZOU Qi, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1994, 30(3): 207-210.
- [12] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxidase dismutase I occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiol*, 1977, 59: 309-314.
- [13] Wu Feibo, Zhang Guoping, Dominy Peter. Four barley genotypes respond differently to cadmium: Lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50: 67-78.
- [14] Chance B, Maehly A C. Assays of catalase and peroxidase[C]//Colowick S P, Kaplan N O(eds). Methods of Enzymology (Vol II) New York: Academic Press, 1955. 764-775.
- [15] 郑逢中,林鹏,郑文教,等. 秋茄对镉的吸收、积累及净化作用的研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(3): 220-226.
ZHENG Feng-zhong, LIN Peng, ZHENG Wen-jiao, et al. Study on the absorption and removal of *Kandelia candel* for pollutant cadmium[J]. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(3): 220-226.
- [16] 洪仁远,杨广笑,刘东华,等. 镉对小麦幼苗的生长和生理生化反应的影响[J]. 华北农学报, 1991, 6(3): 70-75.
HONG Ren-yuan, YANG Guang-xiao, LIU Dong-hua, et al. Effects of cadmium on the growth and physiological and biochemical reactions of wheat seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1991, 6(3): 70-75.
- [17] Hendry G A F, Baker A J M, Swart C F. Cadmium tolerance and toxicity, oxygen radical processes and molecular damage in cadmium tolerant and cadmium-sensitive clones of *Holcus lanatus* L[J]. *Acta Bot Neel*, 1992, 41: 271-281.
- [18] Wu Y Y, Wang X, Liang R L. Ecological effect of compound pollution of heavy metals in soil-plant system II: Effect on uptake by crops alfalfa and tree[J]. *J Appl Ecol*, 1997, 8: 515-552.
- [19] Herren T, Feller U. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17: 1587-1598.
- [20] 江行玉,王长海,赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 856-862.
JIANG Xing-yu, WANG Chang-hai, ZHAO Ke-fu. Study on the mechanism of cadmium resistance in *Phragmites australis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 856-862.
- [21] Lee S H, Oe T, Blair I A. Vitamin C-induced decomposition of lipid hydroperoxides to endogenous genotoxins[J]. *Science*, 2001, 292: 2083-2086.