

Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗 4 种抗氧化酶活性的影响

仇 硕¹, 黄苏珍^{2,①}, 王鸿燕²

(1. 广西壮族自治区·中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006;
2. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014)

摘要: 采用水培法对 Cd 胁迫下黄菖蒲 (*Iris pseudacorus* L.) 幼苗叶片和根系中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)及抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性进行了研究。结果表明, 10、40 和 120 mg · L⁻¹ Cd 胁迫下, 黄菖蒲幼苗叶片和根系中 4 种酶活性的变化不同。10 和 40 mg · L⁻¹ Cd 胁迫下, 黄菖蒲幼苗叶片和根系中的 POD 及 APX 活性、叶片中的 SOD 活性及根系中的 CAT 均明显高于对照; 在 120 mg · L⁻¹ Cd 胁迫下, 叶片中的 POD 活性及根系中的 POD 和 CAT 活性均高于对照; 各处理组根系中的 SOD 活性均低于对照。随处理时间的延长, 40 和 120 mg · L⁻¹ Cd 胁迫处理组叶片的 CAT 活性和 120 mg · L⁻¹ Cd 胁迫处理组根系的 APX 活性逐渐降低, 其他处理组不同酶的活性逐渐升高或先升后降。黄菖蒲叶片及根系中的 4 种酶对 Cd 胁迫的响应能力有差异, 其中 POD 可能是黄菖蒲耐 Cd 胁迫的主要抗性诱导酶。

关键词: 黄菖蒲; Cd 胁迫; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1004-0978(2008)01-0028-05

Effect of Cd stress on the activity of four antioxidases in *Iris pseudacorus* seedlings QIU Shuo¹, HUANG Su-zhen^{2,①}, WANG Hong-yan² (1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2008, 17(1): 28-32

Abstract: Activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in leaves and roots of *Iris pseudacorus* L. seedlings under Cd stress were studied by water culture method. The results showed that, under 10, 40 and 120 mg · L⁻¹ Cd stress, the changes of activities of the four enzymes in leaves and roots were different. Under 10 and 40 mg · L⁻¹ Cd stress, the activities of POD and APX in leaves and roots, SOD in leaves, CAT in roots were higher than those of the control. Under 120 mg · L⁻¹ Cd stress, the activities of POD in leaves, POD and CAT in roots were higher than that of the control. The SOD activity in roots of all treatments was lower than that of the control. As the time of treatment increased, the activity of CAT in leaves under 40 and 120 mg · L⁻¹ Cd stress and that of APX in roots under 120 mg · L⁻¹ Cd stress were decreased gradually, whereas those of the other treatments were increased gradually or increased at first and then decreased. It is concluded that the responsibility of the four enzymes to Cd stress are different, POD may be the main enzyme for inducing resistance of *I. pseudacorus* to Cd stress.

Key words: *Iris pseudacorus* L.; Cd stress; antioxidase

Cd 是环境中最具毒性的重金属之一, 植物受到 Cd 胁迫后, 体内将产生过多的活性氧。广泛存在于植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)则可将超氧阴离子自由基歧化成 H₂O₂ 和 O₂^[1]; 过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)可进一步将 H₂O₂ 转化成 H₂O, 从而减少活性氧对细胞的伤害^[2-4]; 抗坏血酸过氧

化物酶(APX)是抗坏血酸循环中的关键酶之一, 也

收稿日期: 2007-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270940); 江苏省农业高新技术资助项目(BG2003308)

作者简介: 仇 硕(1977—), 男, 山东平邑人, 硕士, 主要从事观赏植物种质资源抗性评价研究。

① 通讯作者 E-mail: hsz1959@163.com

是清除过氧化物的重要酶类之一^[5]。这些抗氧化酶协同作用,能在一定程度上提高植物细胞对活性氧的清除能力。近年来,关于Cd胁迫引起植物体内酶活性变化的研究已有报道^[6-7],但大多以农作物为研究对象。Cd胁迫下,不同植物或同一植物不同器官抗氧化酶活性变化的差异较大^[8-9],因此,应针对不同类群的植物开展相关研究。

黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)为多年生水生植物,原产欧洲,中国各地常见栽培,具有广泛的适应性(水生、湿生、旱生)^[10]以及生物量相对较大、栽培管理较粗放等特点。黄菖蒲花大色艳、叶片青翠碧绿,具有较高的观赏价值。已有的研究表明,黄菖蒲不但对Cu和Cd等重金属具有较好的耐性^[11-13],而且对废水中的碳(C)等污染物也具有较好的去除作用^[14]。因而,黄菖蒲既能修复土壤、净化水体的重金属污染,又能起到良好的绿化作用,具有潜在的应用价值。目前,关于黄菖蒲在Cu胁迫下生理生化方面的耐性机理研究已有报道^[13],但有关黄菖蒲对Cd胁迫耐性机制的研究则未见报道。

作者采用水培法研究了不同浓度Cd胁迫处理及不同处理时间对黄菖蒲叶片和根系抗氧化酶活性的影响,以期探讨黄菖蒲叶片及根系的抗氧化酶系统对Cd毒害的响应及诱导抗性能力,为耐Cd植物黄菖蒲的实际应用提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 材料

实验用黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)种子为无性繁殖群体自然结实的当年籽实。实验于2006年9月至11月在南京中山植物园温室内进行,室内温度15℃~30℃,自然光照。

1.2 方法

1.2.1 Cd胁迫处理方法 挑选饱满的黄菖蒲种子,用体积分数0.5% NaClO溶液消毒20 min,自来水冲洗数次,常温下浸种催芽,待种子萌发后播种到清洁的石英砂中进行砂培。幼苗高约10 cm时,选择株高基本一致的幼苗置于500 mL培养瓶中培养。每瓶3株,用钻孔的泡沫板固定,培养瓶外用黑色塑料薄膜包裹。

用1/2 Hoagland营养液预培养1周后,换用含有Cd的1/2 Hoagland营养液进行培养,3个处理组

的Cd浓度分别为10、40及120 mg·L⁻¹,营养液中的Cd以CdCl₂·2.5 H₂O形式添加,以不含Cd的1/2 Hoagland营养液为对照,营养液pH 6.8。每5天更换1次营养液,每次更换营养液后用HCl或NaOH调节pH值,每处理3次重复。在处理1、4、7、10及13 d时,分别取样测定SOD、POD、CAT及APX的活性。

1.2.2 酶活性测定方法 SOD、POD和CAT的提取方法为:剪取0.3 g倒数第2片叶和所有根系,洗净后,分别加入5 mL 50 mmol·L⁻¹ PBS(含质量体积分数1%的PVP, pH 7.8),冰浴中研磨至匀浆,4℃、12 000 r·min⁻¹离心15 min,所得上清液即可用于酶活性测定。SOD活性测定参照李美茹等^[15]的方法;POD及CAT活性测定参照波钦诺克^[16]的方法。

APX的提取方法为:剪取0.3 g倒数第2片叶和所有根系,洗净后,分别加入4 mL 50 mmol·L⁻¹ PBS(含质量体积分数1%的PVP、2 mmol·L⁻¹ AsA及5 mmol·L⁻¹ EDTA-Na₂, pH 7.8),冰浴中研磨至匀浆,4℃、12 000 r·min⁻¹离心15 min,所得上清液即可用于酶活性测定。APX活性测定参照朱祝军等^[17]的方法。

2 结果和分析

2.1 Cd胁迫对黄菖蒲SOD活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)活性是反映植物抗逆性强弱的重要指标之一^[18]。不同浓度Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中SOD活性的影响见表1。由表1可以看出,Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中SOD活性的影响有一定差异。除120 mg·L⁻¹ Cd胁迫13 d时黄菖蒲幼苗叶片中的SOD活性低于对照外,其余各处理组在处理期内叶片中的SOD活性均高于对照。其中10 mg·L⁻¹ Cd胁迫条件下,黄菖蒲叶片中的SOD活性在处理期间(1~13 d)均稍高于对照且随时间延长呈持续升高的趋势,而40和120 mg·L⁻¹ Cd处理组叶片中的SOD活性则呈现先升后降的变化趋势。如用120 mg·L⁻¹ Cd处理10 d时,黄菖蒲叶片中的SOD活性达到最高值139.36 U·g⁻¹(FW),至处理13 d时SOD活性下降至83.40 U·g⁻¹(FW),甚至低于同一时间段对照组叶片的SOD活性[98.81 U·g⁻¹(FW)]。

由表1还可以发现,经不同浓度和不同时间的Cd胁迫处理后,黄菖蒲幼苗根系中的SOD活性均低于对照,且随Cd处理浓度和处理时间的增加呈先上升后下降的变化趋势。与叶片中的SOD活性变化趋势相比,Cd处理浓度越高,根系中的SOD活

性最高点出现的时间越早且活性也相对较低。如用 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理4 d时,黄菖蒲幼苗根系中的SOD活性就达到峰值 $56.50 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$ 。对比发现,Cd胁迫对黄菖蒲幼苗根系中SOD活性的诱导能力低于叶片。

表1 不同浓度Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中SOD活性的影响
Table 1 Effects of different concentrations of Cd stress on SOD activity in leaves and roots of *Iris pseudacorus* L. seedlings

Cd 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	不同时间叶片中的SOD活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$ SOD activity in leaf at different times					不同时间根系中的SOD活性/ $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$ SOD activity in root at different times				
	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d
0(CK)	87.13	90.12	90.40	96.65	98.81	56.80	64.88	70.74	76.39	78.77
10	89.72	92.84	99.49	104.84	110.82	46.60	57.40	64.00	65.36	63.91
40	89.19	105.91	110.78	137.98	125.39	41.64	52.47	57.40	65.87	61.55
120	101.40	110.91	119.94	139.36	83.40	33.10	56.50	54.10	52.00	45.90

2.2 Cd胁迫对黄菖蒲体内POD活性的影响

过氧化物酶(POD)是重要的抗氧化酶之一,在植物呼吸代谢过程中起着重要的作用。POD活性的变化是监测植物受重金属毒害的重要指标之一^[19]。不同浓度Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中POD活性的影响见表2。表2中的数据显示,在处理时间内,各处理组黄菖蒲叶片和根系中POD活性均高于对照,且在处理1、4、7和10 d时表现出随Cd浓度提高而增加的趋势。 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理1~13 d,黄菖蒲叶片和根系中的POD活性均高于对照,且基本保持在相对稳定的水平; $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理1~13 d,黄菖蒲叶片和根系中的POD活性始终高于对

照,且基本表现出随浓度升高逐渐增加的趋势,只有在处理7 d时,叶片中的POD活性略有降低。 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理1~13 d,黄菖蒲幼苗叶片中的POD活性呈先升后降的变化趋势,在处理第10天时达到最高值 $15.66 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}(\text{FW})$,为同一时间对照组黄菖蒲叶片POD活性的224.03%;而根系中的POD活性则呈持续升高的趋势,并高于对照和其他处理组,至处理第13天时达到最大值 $53.58 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}(\text{FW})$,为同一时间对照组黄菖蒲根系中POD活性的188.36%。实验结果表明,Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中的POD活性均有较强的诱导能力。

表2 不同浓度Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中POD活性的影响
Table 2 Effects of different concentrations of Cd stress on POD activity in leaves and roots of *Iris pseudacorus* L. seedlings

Cd 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Conc. of Cd	不同时间叶片中的POD活性/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}(\text{FW})$ POD activity in leaf at different times					不同时间根系中的POD活性/ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}(\text{FW})$ POD activity in root at different times				
	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d
0(CK)	5.82	6.14	6.70	6.99	6.54	28.44	29.04	26.56	27.98	28.46
10	7.82	8.35	8.62	9.69	9.65	32.34	33.61	35.06	38.09	40.35
40	9.72	10.54	9.90	12.56	15.12	37.16	38.84	39.80	42.98	48.45
120	10.66	11.48	12.01	15.66	12.12	38.10	39.41	40.78	44.96	53.58

2.3 Cd胁迫对黄菖蒲体内CAT活性的影响

过氧化氢酶(CAT)属于含Fe的血红蛋白酶类,可催化 H_2O_2 分解成 H_2O ,在植物体内可与SOD和POD等抗氧化酶协同作用,清除植物体内的氧自由基等。不同浓度Cd胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中CAT活性的影响见表3。表3数据表明,处理1~

13 d,对照及各处理组黄菖蒲叶片中CAT活性变化趋势各异。 40 和 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫处理组黄菖蒲幼苗叶片中的CAT活性随处理时间延长而逐渐降低,并在处理4 d后低于对照,其中, $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理至第13天,叶片中的CAT活性最低,仅为 $9.05 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}(\text{FW})$,为该时间段对照组

黄菖蒲叶片 CAT 活性的 67.5%。10 mg · L⁻¹ Cd 处理组黄菖蒲幼苗叶片中的 CAT 活性高于对照,并随处理时间的延长逐渐升高,在处理第 13 天时达到最高值 15.39 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW),为该时间段对照组黄菖蒲叶片 CAT 活性的 114.9%。

由表 3 还可以看出,在处理时间内,各处理组黄菖蒲幼苗根系中的 CAT 活性均高于对照,其中 10 和

40 mg · L⁻¹ Cd 处理组黄菖蒲幼苗根系的 CAT 活性呈先降后升的趋势,而 120 mg · L⁻¹ Cd 处理组根系的 CAT 活性则随处理时间延长而缓慢上升,并在第 13 天达到最高值 2.65 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW),为该时间段对照组根系 CAT 活性的 169.8%。对比发现,Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗根系 CAT 活性的诱导能力高于叶片。

表 3 不同浓度 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中 CAT 活性的影响

Table 3 Effects of different concentrations of Cd stress on CAT activity in leaves and roots of *Iris pseudacorus* L. seedlings

Cd 浓度/mg · L ⁻¹ Conc. of Cd	不同时间叶片中的 CAT 活性/μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹ (FW) CAT activity in leaf at different times					不同时间根系中的 CAT 活性/μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹ (FW) CAT activity in root at different times				
	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d
	0 (CK)	13.22	14.02	13.75	13.37	13.39	1.68	1.65	1.58	1.54
10	14.25	14.24	14.32	14.65	15.39	1.90	1.74	1.74	1.80	2.07
40	14.90	12.83	12.82	12.73	11.25	2.07	1.90	1.92	2.11	2.56
120	14.12	12.45	12.20	10.88	9.05	2.15	2.37	2.45	2.45	2.65

2.4 Cd 胁迫对黄菖蒲体内 APX 活性的影响

Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响见表 4。由表 4 可见,受 Cd 胁迫后,对照组及各处理组黄菖蒲叶片中的 APX 活性随时间的延长表现出不同的变化趋势。总的来看,10 和 40 mg · L⁻¹ Cd 处理组黄菖蒲幼苗叶片的 APX 活性均显著高于对照;而 120 mg · L⁻¹ Cd 处理组叶片的 APX 活性在处理 1~7 d 时略高于对照,但明显低于 10 和 40 mg · L⁻¹ Cd 处理组;处理 10 和 13 d 时 APX 活性比对照略低,却显著低于 10 和 40 mg · L⁻¹ Cd 处理组。与对照相比,Cd 浓度越高,各处理组 APX 活性最高值出现的时间就越早且峰值相对降低,如 10 mg · L⁻¹ Cd 处理组黄菖蒲叶片中的 APX 活性在处理第 10 天时达到最高值 22.86 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW),而 120 mg · L⁻¹ Cd 处理组则在处理第 4 天时 APX 活性达到最高值 11.56 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW)。

由表 4 还看出,受 Cd 胁迫后黄菖蒲根系的 APX 活性变化趋势与叶片基本相似,且对照组及处理组根系的 APX 活性都高于叶片。10 和 40 mg · L⁻¹ Cd 处理组黄菖蒲根系中的 APX 活性明显高于对照,其中,10 mg · L⁻¹ Cd 处理组根系的 APX 活性随处理时间延长而逐渐增加,至 Cd 胁迫至第 13 天时达到最高值 27.69 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW);40 mg · L⁻¹ Cd 处理组根系的 APX 活性在 Cd 胁迫第 10 天时达到最高值 30.74 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW),在 Cd 胁迫第 13 天下降至 24.84 μmol · g⁻¹ · min⁻¹ (FW)。120 mg · L⁻¹ Cd 处理组根系中的 APX 活性随处理时间的延长而逐渐下降,在处理第 1 天和第 4 天稍高于对照,处理第 7 天、第 10 天和第 13 天时均明显低于对照。以上结果说明,在 Cd 胁迫下,特别是在 Cd 胁迫早期,黄菖蒲体内的 APX 表现出较强的抗氧化防御能力。

表 4 不同浓度 Cd 胁迫对黄菖蒲幼苗叶片和根系中 APX 活性的影响

Table 4 Effects of different concentrations of Cd stress on APX activity in leaves and roots of *Iris pseudacorus* L. seedlings

Cd 浓度/mg · L ⁻¹ Conc. of Cd	不同时间叶片中的 APX 活性/μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹ (FW) APX activity in leaf at different times					不同时间根系中的 APX 活性/μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹ (FW) APX activity in root at different times				
	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d	1 d	4 d	7 d	10 d	13 d
	0 (CK)	7.49	8.01	7.63	7.86	7.89	13.63	13.25	14.21	13.78
10	10.23	12.25	20.62	23.86	22.03	18.03	23.62	25.47	27.39	27.69
40	12.90	17.85	22.56	20.18	19.16	20.32	26.37	28.64	30.74	24.84
120	8.56	11.56	8.34	7.53	6.03	16.52	13.45	11.28	10.65	8.23

3 讨论和结论

在实验期间, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理组黄菖蒲幼苗叶片和根系中的 POD、CAT 及 APX 活性均有不同程度的升高, 黄菖蒲叶片中的 SOD 活性也高于对照, 表明 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫对黄菖蒲叶片中 SOD、POD、CAT 及 APX 的活性具有较好的诱导能力, 同时根系中 POD、CAT 及 APX 活性的提高对黄菖蒲幼苗根系耐 Cd 胁迫有一定的解毒效应, 从而使黄菖蒲能在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫条件下较好生长^[12]。在 40 和 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫条件下, 黄菖蒲叶片和根系中的 SOD 活性均随胁迫时间延长而呈先升后降的变化趋势, 叶片中的 CAT 活性除在第 1 天稍高于对照外, 均随处理时间延长而降低。实验结果说明, 在高浓度 Cd 胁迫下, 黄菖蒲体内的抗氧化酶活性受到一定程度的影响, 可能是 Cd 毒害干扰了这些酶的合成, 破坏了酶蛋白的结构, 使活性氧自由基数量超过了植株本身的清除能力, 最终导致黄菖蒲的生长受到抑制^[12]。

实验结果表明, 不同浓度 Cd 胁迫在不同胁迫时间对黄菖蒲幼苗叶片和根系中 SOD、POD、CAT 及 APX 的活性均产生了不同程度的影响, 说明在黄菖蒲叶片及根系中的这 4 种酶对 Cd 胁迫的响应能力存在差异, 同时表明黄菖蒲体内的这 4 种酶对 Cd 胁迫的防御能力不同。此外, POD 是黄菖蒲耐 Cd 胁迫的主要抗性诱导酶, 与黄菖蒲耐 Cd 胁迫的关系最密切。在黄菖蒲叶片中, SOD 的抗氧化能力高于根系; 而在其根系中, CAT 的抗氧化能力强于叶片。严重玲等^[20]认为, 抗氧化酶活性的维持与提高是植物耐 Cd 毒害的生理生化机制之一。结合黄菖蒲体内 4 种酶活性的变化, 明确了 SOD 等 4 种酶的协同作用对及时清除黄菖蒲体内由 Cd 胁迫而积累的氧自由基有重要作用, 能相对缓解 Cd 胁迫对植株的伤害, 从而使黄菖蒲植株在一定浓度范围和时间内对 Cd 胁迫表现出较强的耐(抗)性。

参考文献:

- [1] Marvin L S. Toxic oxygen species and protective systems of the chloroplast[J]. *Physiol Plant*, 1988, 72: 681-689.
- [2] Foyer C H, Lopez-delgado H, Dat J F, et al. Hydrogen peroxide and glutathione—associated mechanism of acclamatory stress tolerance and signaling[J]. *Physiol Plant*, 1997, 100: 241-254.
- [3] Noctor C, Foyer C H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control[J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1998, 49: 249-279.
- [4] Alscher R C, Donahue J L, Cramer C L. Reactive oxygen species and antioxidant: relationship in green cells[J]. *Physiol Plant*, 1997, 100: 224-233.
- [5] Kozi A. Ascorbate peroxidase—a hydrogen peroxide scavenging enzyme in plants[J]. *Physiol Plant*, 1992, 85: 235-241.
- [6] 陈宏, 徐秋曼, 王蔚, 等. 镉对小麦幼苗脂质过氧化和保护酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(3): 399-403.
- [7] 张芬琴, 孟红梅, 沈振国, 等. 镉胁迫下绿豆和箭舌豌豆幼苗的抗氧化反应[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(7): 1384-1389.
- [8] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 87-91.
- [9] Julia K, Sashwati R, John A V, et al. Antioxidant responses to simulated acid rain and heavy metal deposition in birch seedlings[J]. *Environ Pollut*, 1997, 95(2): 249-258.
- [10] 韩玉林, 仇硕, 夏采意, 等. 黄菖蒲适生环境筛选[J]. *植物资源与环境学报*, 2006, 15(2): 38-41.
- [11] 张开明, 佟海英, 黄苏珍, 等. Cu 胁迫对黄菖蒲和马蔺 Cu 富集及其他营养元素吸收的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(1): 18-22.
- [12] 原海燕. 鸢尾属(*Iris* L.) 4 种植物镉(Cd) 积累、耐性机理及影响因素研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [13] 张开明, 黄苏珍, 原海燕, 等. 水生花卉黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.) Cu 胁迫抗(耐)性研究[J]. *江苏农业科学*, 2006(6): 217-220.
- [14] Morris M. A green treatment for wastewater[J]. *Brit Sugar Beet Rev*, 1996, 64(4): 16-17.
- [15] 李美如, 刘鸿先, 王以柔, 等. 钙对水稻幼苗抗冷性的影响[J]. *植物生理学报*, 1996, 22(4): 379-384.
- [16] 波钦诺克 X H. 植物生物化学分析方法[M]. 荆家海, 丁钟荣, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [17] 朱祝军, 喻景权, Joska G, 等. 氮素形态和光照强度对烟草生长和 H_2O_2 清除酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 379-385.
- [18] 王建华, 刘鸿先, 徐同. 超氧化物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用[J]. *植物生理学通讯*, 1989(1): 1-7.
- [19] Shradha S, Susan E, D'Souza S F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L. [J]. *Chemosphere*, 2006, 62: 233-246.
- [20] 严重玲, 洪业汤, 付舜珍, 等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 488-492.