

圆叶决明(*Chamaecrista rotundifolia*) 对重金属镉胁迫的响应及镉吸收效果研究

钟珍梅, 黄勤楼, 王义祥, 黄毅斌

(福建省农科院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要:以圆叶决明 2228(*Chamaecrista rotundifolia*)为材料,采用土培法,研究重金属镉对圆叶决明 2228 保护酶(SOD 和 POD)、生长(生物量、株高、SPAD 值和含水量等)的影响,同时分析圆叶决明对镉的吸收效果。结果表明,重金属镉胁迫下圆叶决明 2228 保护酶活性均随着镉处理浓度的升高呈先升后降的趋势,其中 20 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下 SOD 酶活性最强,50 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下 POD 酶活性最强;镉对圆叶决明的生长抑制表现为抑制植物的生长,降低株高和生物量,但与叶绿素相关的 SPAD 值无显著变化。通过镉含量分析可知,圆叶决明 2228 吸收的镉量均未超过镉临界指标含量,因此该植物不是镉超富集植物,但生物富集系数大于 1,为镉耐性植物。由于圆叶决明生长过程中生物量大,在生长过程中可通过生物量带走部分重金属镉,圆叶决明 2228 具有修复轻度镉污染土壤的潜能。

关键词:圆叶决明 2228;镉;保护酶;生长;生物富集

中图分类号:X503.233 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2287-06

Response to Cadmium Stress and Cadmium Uptake of *Chamaecrista rotundifolia*

ZHONG Zhen-mei, HUANG Qin-lou, WANG Yi-xiang, HUANG Yi-bin

(Agricultural Ecology Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract:The objective of this study is to analyze the effect of cadmium(Cd) stress on cadmium uptake of the studied plant. *Chamaecrista rotundifolia* 2228, growing in plastic pots(d=25 cm), was investigated in terms of changes of antioxidant enzymes(Super Oxide Dismutase, SOD and Peroxidase, POD), and growth indices (biomass, plant height, chlorophyll content-SPAD value, and water content). The results indicated that with increasing concentrations of applied Cd, the enzyme activities increased and then decreased. The strongest activities of SOD and POD were observed at a Cd stress level of 20 mg·kg⁻¹ and 50 mg·kg⁻¹, respectively. The results also showed that the presence of Cd significantly limited the growth of *Chamaecrista rotundifolia* 2228, implying by the reduced plant height and biomass, in comparison of the control. However, no significant change of SPAD value was identified at all levels of Cd stress. Cd contents of all the plants had never exceeded the critical value, which implied that *Chamaecrista rotundifolia* 2228 might not be a hyper-accumulator for Cd. However, the plant showed a substantial tolerance level to Cd as the bioaccumulation factor for most of the treatments was greater than one. A substantial amount of Cd could still be taken by *Chamaecrista rotundifolia* 2228 from the contaminated soil considering such high biomass values of the plant accumulated during the growing process. Clearly, *Chamaecrista rotundifolia* 2228 has a promising remedial potential for soils with a light or middle level of Cd contamination.

Keywords:*Chamaecrista rotundifolia* 2228; cadmium; antioxidant enzymes; growth; bioaccumulation

镉(Cd)是植物非必需元素,其生物毒性非常强,它不参与生物的结构和代谢活动,即使在低浓度下对植物体也会产生毒害作用^[1]。镉对植物的毒害作用主

要表现在影响植物地上部分生长、抑制植物光合作用和蒸腾作用、干扰植物的代谢进程、降低产量和品质、加速植物衰老等^[1-5]。但不同的植物在镉胁迫下表现不尽相同。

圆叶决明(*Chamaecrista rotundifolia*)是近几年从澳大利亚国际农业中心引进的豆科牧草,经过多年研究发现,该草抗逆性强、产量高,适合南方山地种植。我们前期已做了大量关于干旱、水分、低温、金属铝、

收稿日期:2010-06-08

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAD95B08);福建省自然科学基金项目(2008J0257)

作者简介:钟珍梅(1975—),女,福建邵武人,硕士研究生,助理研究员,主要从事农业生态研究。E-mail:mume19@126.com

通信作者:黄毅斌 E-mail:ecology@public.fz.fj.cn

镉等胁迫下圆叶决明生理生化反应的研究^[6-12],而重金属镉胁迫下圆叶决明的生长响应及对重金属镉的吸收能力尚未报道。由于应用推广过程中常将圆叶决明作为生态牧草套种于果园、茶园中,陈剑侠等报道,受到人为因素的影响,福建省部分茶园土壤存在不同程度重金属镉污染^[13]。本文采用盆栽试验,研究镉胁迫对圆叶决明生长的影响,以此评估圆叶决明对重金属镉的最高耐受浓度,同时分析其吸镉能力,以期筛选既适合南方种植又具有修复重金属镉污染土壤能力的植物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

盆栽试验于2009年6至8月在农业生态研究所网室进行。盆栽用土取自福建典型山地茶园红壤,土壤理化性状如下:全氮0.005%,全磷0.160%,全钾2.336%,有机质0.755%,pH值5.23,速效氮 $7\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,速效磷痕量,速效钾 $32.05\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,重金属镉 $0.82\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。植物材料采用福建省农科院农业生态研究所自有矮生圆叶决明品种2228。

1.2 试验设计

准备15个口径为25cm的塑料盆,每盆装土8.9kg,施入基肥 $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1592.61mg, KCl 758.91mg, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2026.38mg, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ 118.41mg,拌匀,稳定2周后播种,圆叶决明生长至8~9片叶进行重金属胁迫,重金属镉以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 施入。试验设置4个处理:处理I施 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉,处理II施 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉,处理III施 $80\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉,处理IV施 $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉。以不加重金属为对照(CK),每处理3次重复,处理后8、24、48h和72h取叶片测定SOD和POD酶活性,其他指标在植株生长两个月后收割时测定。收割时处理IV枯死,采集枯叶、茎和根,其他处理用自来水洗净根系泥土,用蒸馏水清洗植株,再用吸水纸吸干表面水分,于干燥通风处快速晾置10min,分离地上部和地下部,茎、叶、根称重,置于90℃干燥箱中杀青20min,于60℃下烘至恒重,用电子天平称取各部分干重,烘干样品用粉碎机粉碎,用于镉的测定。

1.3 测定方法

植物生物量、株高用常规方法测定,SPAD值用SPAD仪测定,植物重金属镉送至福建省农科院中心实验室测定,测定方法依据GB/T13082,土壤重金属镉送至福建省分析检测中心检测,测定方法依据GB/

T5009.15—2003。

SOD酶活性照王爱国等(1983)的方法测定;POD酶活性参照袁庆华等(2002)的方法测定。

1.4 数据分析

用Excel和SPSS11.5进行数据处理和统计分析,数据采用“平均数±标准误”,重金属含量为3次重复混合样的测定结果,统计分析采用邓肯氏新复级差法。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下圆叶决明酶活性的变化

圆叶决明SOD酶活性随时间和处理浓度的变化如图1所示。随着处理时间延长,SOD酶活性呈升高趋势,且处理时间对SOD酶活性的影响差异极显著($P<0.01$)。随着处理浓度增加,SOD酶活性也呈先升后降趋势。镉胁迫8h后,处理II SOD酶活性最高,显著高于对照和其他处理,而处理IV的SOD酶活性最低,显著低于对照和其他处理。镉胁迫24h后,SOD酶活性总体升高,其中处理I SOD酶活性最高,显著高于对照和其他处理,其他处理和对照之间差异不显著。镉胁迫48h后,SOD酶活性趋于稳定,其中处理I的SOD酶活性最高,显著高于对照和处理II。镉胁迫72h后,处理I的SOD酶活性最高,处理I、II和III的SOD酶活性显著高于对照和处理IV。表明在 $20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下,即处理I的SOD酶活性最强,镉胁迫72h,SOD酶活性最强。

圆叶决明POD酶活性随时间和处理浓度的变化如图2所示。随着处理时间延长,除了处理I外,其他处理POD酶活性均呈先升后降的趋势,且处理时间对SOD酶活性的影响差异极显著($P<0.01$);随着处理浓度增加,POD酶活性也呈先升后降再升的趋势。镉胁迫8h后,处理I的POD酶活性最高,其次为处理IV,两者之间差异不显著,但显著高于对照、处理II和III。镉胁迫24h后,除了处理I外,其他处理POD酶活性升高,其中处理II的POD酶活性最高,显著高于对照、处理I和III。镉胁迫48h后,POD酶活性继续升高,其中处理II POD酶活性最高,显著高于对照和处理I。镉胁迫72h后,POD酶活性大幅度降低,处理I的POD酶活性最高,显著高于处理III。表明在 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下,即处理II的POD酶活性最强,镉胁迫48h,POD酶活性最强。

双因素方差分析结果表明,处理浓度和处理时间交互作用对SOD酶活性和POD酶活性影响也极显著($P<0.01$),且SOD酶活性、POD酶活性和镉处理浓

度及处理时间呈线性相关($R=0.810, 0.829$)。

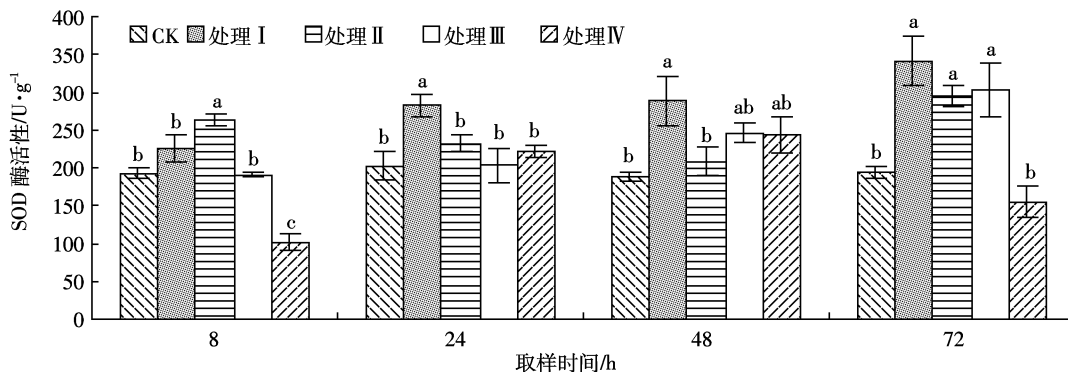
2.2 镉胁迫下圆叶决明生长的响应

镉胁迫后处理Ⅳ植株枯死,其他处理仍然能保持一定的生长,叶面积、SPAD 值、株高、地上部鲜重和含水量的变化如表 1 所示。镉胁迫对 SPAD 值无显著影响,随着镉浓度的增加,叶面积呈降低趋势,但仅处理Ⅲ叶面积显著低于对照。镉胁迫对圆叶决明 SPAD 值无显著影响,表明经过长时间生长后,SPAD 值趋于稳定。

镉胁迫后,圆叶决明株高显著降低,生长受到抑制。镉处理后圆叶决明生物量显著降低,其中处理Ⅲ生物量最低,显著低于对照和其他处理,但与对照相比,仍然能保持 32.71%的生物量,表明圆叶决明 2228 是一种高抗镉植物,能适应浓度高达 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉胁迫。镉胁迫对圆叶决明的含水量无显著影响。

2.3 圆叶决明吸收镉效果分析

圆叶决明吸收镉的量如表 2 所示。随着镉浓度增加,圆叶决明茎、叶和根中镉含量也随之增加,镉



注:图中相同的字母表示差异不显著,字母不同表示差异显著,显著性水平为 0.05,下同。

图 1 镉处理后圆叶决明 SOD 酶活性的变化

Figure 1 The change of SOD enzyme under Cd stress

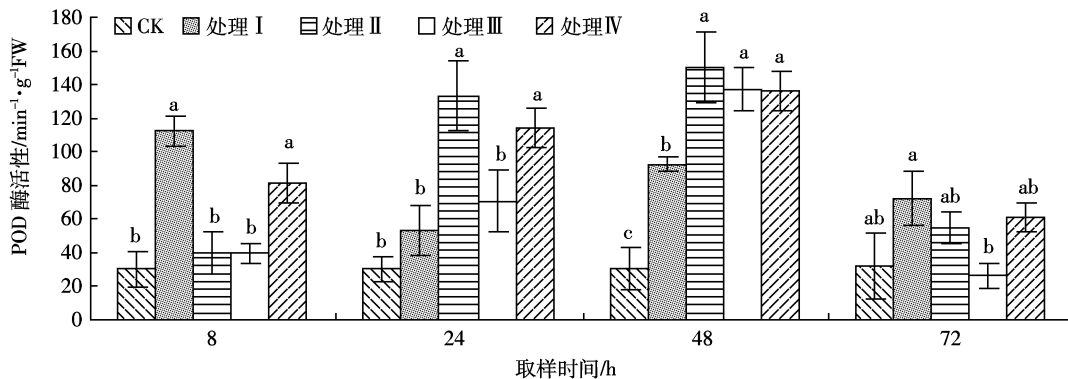


图 2 镉处理后圆叶决明 POD 酶活性的变化

Figure 2 The change of POD enzyme under Cd stress

表 1 镉胁迫下圆叶决明生理和生长的变化

Table 1 Change of physiology and growth of *Chamaecrista rotundifolia* under Cd stress

处理 treatment	SPAD 值 SPAD value	叶面积 Leaf area/m ²	株高 Plant height/cm	生物量 biomass/g	含水量 water content/%
CK	33.37±1.73a	0.22±0.02a	69.93±4.04a	51.58±2.37a	55.84±3.62a
处理 I	34.00±2.65a	0.13±0.01ab	45.43±0.5b	31.57±1.67b	53.44±1.29a
处理 II	37.53±2.09a	0.14±0.05ab	43.43±0.28b	23.63±9.91bc	54.54±10.52a
处理 III	31.1±2.58a	0.08±0.02b	44.87±1.48b	16.87±1.90c	47.15±5.96a
处理 IV	—	—	—	—	—

注:处理Ⅳ收割的时候枯死,所以 SPAD 值、叶面积、株高和含水量无测定值;表格数据为 3 次测定的平均值,表中同一列数据后字母相同的表示差异不显著,字母不同表示差异显著,显著性水平为 0.05。

浓度与叶、根中的镉含量呈显著相关($R=0.893, 0.893$; $P<0.05$), 地上部镉含量也随镉处理浓度的增加而增加, 但不与镉浓度显著相关(表 2、表 3)。生物富集系数是指植物地上部吸收镉量与土壤中镉含量的比值, Baker^[14]认为, 超累积植物富集系数远远大于 1, 而排斥型作物富集系数往往小于 1。从表 3 可知, 对照圆叶决明对镉富集系数最大, 为 6.83, 其次是处理Ⅳ, 生物富集系数为 6.29, 但处理Ⅳ由于植株枯死, 在实际应用中意义不大, 其他 3 种处理富集系数从大到小的顺序为处理Ⅱ>处理Ⅰ>处理Ⅲ, 其生物富集系数均大于 1, 表明圆叶决明 2228 不是重金属镉排斥植物。当土壤中含少量镉($0.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 不影响圆叶决明的生长, 但人为添加镉后, 圆叶决明吸收效果变差, 富集系数降低, 均低于对照。

3 讨论

Perfus 等^[15]认为, Cd^{2+} 累积会导致叶绿体及色素解体、增加非光化学猝灭并降低光合效率。关丽等^[16]研究表明, 随着水稻植株体内镉浓度升高, 水稻中叶绿素含量逐渐下降, 二者呈显著相关。本研究发现重金属镉胁迫后圆叶决明 2228 的生长受到抑制, 表现为株高降低、生物量减少, 但 SPAD 无显著变化。镉对植物生长的抑制有时间过程, 当圆叶决明刚受到镉胁

迫时, 可能叶绿素含量发生改变, 但经过一段时间生长和适应, 其光合作用受抑制过程稳定, 因此导致 SPAD 值无明显变化, 镉也可能不抑制与 SPAD 值相关的叶绿素含量, 但抑制圆叶决明光合作用中其他叶绿素含量。

SOD 和 POD 酶是植物抗氧化系统中的两种保护酶, Pereira 等^[17]研究发现, 用 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ 处理后, 菖麻 SOD 的 4 个同功酶 (2 个 Mn-SOD 和 2 个 Cu/Zn-SOD) 在根和叶中的总活性以及 4 种同功酶活性均无显著差异。在海藻拟微球藻上的研究发现, Cd^{2+} 处理后 POD 活性增加了 4 倍, 而 SOD 活性则显著下降^[18]。本研究发现镉处理后, 圆叶决明 2228 的 SOD 和 POD 酶活性升高, 当镉浓度达到一定量时, 酶活性降低, 表明圆叶决明 2228 抗重金属镉的生理过程可能和 SOD 及 POD 酶活性相关。由于抗氧化系统包含多种组分, 是一个复合系统, 不同的植物启动的保护机制不尽相同, 因此可能激活不同的保护酶活性。

目前, 利用植物提取土壤中的重金属有两种途径: 一是利用超累积植物的超强吸收能力, 提取土壤中重金属; 另一种修复方式是选用生长较为迅速、生物量较大、富集重金属能力相对较强的非超累积植物提取重金属。超富集植物能够吸收较一般植物高 100 倍的重金属而对本身未造成任何伤害, 但这类植物生

表 2 圆叶决明对重金属镉的吸收效果

Table 2 The uptake of Cd by *Chamaecrista rotundifolia*

处理 treatment	镉含量 Cd concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			地上部镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ concentration in above-ground	土壤镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd concentration in soil	生物富集系数 biological enrichment coefficient
	茎 stem	叶 leaf	根 root			
CK	8.22	2.02	10.39	5.12	0.75	6.83
处理Ⅰ	75.55	3.44	100.63	39.495	18	2.19
处理Ⅱ	121.16	3.57	235.58	62.365	28	2.23
处理Ⅲ	139.93	48.35	424.09	94.14	47	2.01
处理Ⅳ	1 175.01	44.58	1 128.9	609.795	97	6.29

注: 国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)规定, 当土壤 pH 值为 5.23~6.5 时, 土壤中镉含量必须 $\leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此对照即不添加外源镉的土壤中的镉含量已经超过国家标准, 对照的土壤为轻度镉污染土壤。

表 3 镉处理浓度与圆叶决明茎、叶和根镉含量的相关性分析

Table 3 The correlation analysis between the Cd concentration and Cd content in stem, leaves and root

		镉浓度 Cd concentration	镉含量 Cd concentration			
			茎 stem	叶 leaf	根 root	地上部 above ground
镉浓度 Cd concentration		1				
镉含量	茎 stem	0.76	1			
Cd concentration	叶 leaf	0.893*	0.633	1		
	根 root	0.893*	0.969**	0.786	1	
	地上部 above ground	0.779	0.999**	0.661	0.977**	1

物量较小^[9]。杨勇等^[20]研究发现,由于生物量大,非超富集植物烟草生长过程中从土壤中提取的镉比超累积植物遏蓝菜多。本研究发现,圆叶决明 2228 在含镉 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中仍然能保持 32.71% 的生物量,且生物富集系数大于 1,说明圆叶决明 2228 是一种高抗镉植物,但土壤镉浓度越高,其对镉吸收系数越小,因此圆叶决明 2228 不适合应用于高浓度镉污染土壤的生物修复。圆叶决明 2228 生物产量高(干物产量建植当年最高可达 $7960 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),种子来源丰富,目前已在南方丘陵红壤山地广泛推广种植,其对镉具有高抗性,在轻度镉污染土壤中的生物富集系数大,因此可将其应用于轻度镉污染土壤的生物修复。

4 结论

(1) 镉处理浓度和处理时间对圆叶决明 2228 SOD 和 POD 酶活性的影响均表现为差异显著 ($P=0.00<0.01$),随着镉处理浓度的增加,SOD 酶活性和 POD 酶活性均表现为先增后降的趋势, $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下 SOD 酶活性最强, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下 POD 酶活性最强。随着镉处理时间的延长,SOD 酶活性呈增高趋势,镉胁迫 72 h, SOD 酶活性最强;POD 酶呈先增后降低的趋势,镉胁迫 48 h, POD 酶活性最强。

(2) 研究表明,圆叶决明 2228 能在 $0\sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中生长,表现为生长受抑制,植株变矮,生物量降低,当土壤镉含量为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,圆叶决明 2228 仍能保持 32.71% 的生物量,表明圆叶决明 2228 是一种高抗镉植物。

(3) 圆叶决明 2228 茎、叶和根中镉含量随镉浓度增加而增加,由于其地上部镉含量未超过临界指标含量 ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),圆叶决明 2228 不是镉超富集植物,但在 4 种浓度的镉胁迫下,圆叶决明 2228 对镉的生物富集系数均大于 1,说明圆叶决明 2228 是镉敏感性植物。

参考文献:

- [1] Sanita T L, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105–130.
- [2] 郭飞波, 张国平. 不同镉水平下大麦幼苗生长和镉及养分吸收的品种间差异[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1595–1599.
WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Differences between barley cultivars in seedling growth and in uptake of cadmium and nutrients under various Cd leave[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1595–1599.
- [3] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1863–1868.
HE Jun-yu, WANG Yang-yang, REN Yan-fang, et al. Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1863–1868.
- [4] 郭艳丽, 台培东, 韩艳萍, 等. 镉胁迫对向日葵幼苗生长和生理特性的影响[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(12): 2291–2296.
GUO Yan-li, TAI Pei-dong, HAN Yan-ping, et al. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sunflower seedlings[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(12): 2291–2296.
- [5] 李源, 李金娟, 魏小红. 镉胁迫下蚕豆幼苗抗氧化能力对外源 NO 和 H_2O_2 的响应[J]. *草业学报*, 2009, 18(6): 186–191.
LI Yuan, LI Jin-juan, WEI Xiao-hong. Responses of antioxidative capability in horsebean seedling to NO and H_2O_2 under Cd stress[J]. *Acta Pratacuturae Sinica*, 2009, 18(6): 186–191.
- [6] 林永辉, 郑向丽, 詹杰, 等. 不同品系圆叶决明牧草耐铝特性比较研究[J]. *福建农业学报*, 2008, 23(3): 322–326.
LIN Yong-hui, ZHENG Xiang-li, ZHAN Jie, et al. Al^{3+} tolerance of *Chamaecrista* spp[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 23(3): 322–326.
- [7] 翁伯琦, 江福英, 方金梅, 等. 低温胁迫对豆科牧草圆叶决明苗期植株 C、N 代谢的影响[J]. *草业学报*, 2006, 15(6): 64–69.
WENG Bo-qi, JIANG Fu-ying, FANG Jin-mei, et al. Effect of chilling stress on carbon and nitrogen metabolism of leguminous *Cassia rotundifolia* seedlings[J]. *Acta Pratacuturae Sinica*, 2006, 15(6): 64–69.
- [8] 姜照伟, 翁伯琦, 黄元仿, 等. 喷施和土施镧对圆叶决明生长影响的比较[J]. *作物学报*, 2008, 34(7): 1273–1279.
JIANG Zhao-wei, WENG Bo-qi, HUANG Yuan-fang, et al. Comparison of effects of lanthanum application on growth by spraying and soil dressing in *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1273–1279.
- [9] 翁伯琦, 黄东风, 王义祥, 等. 施硼对圆叶决明植株生长、养分含量及固氮能力的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(4): 343–348.
WENG Bo-qi, HUANG Dong-feng, WANG Yi-xiang, et al. Effects of boron on the growth, nutrients and nitrogen-fixing ability of *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2007, 15(4): 343–348.
- [10] 任丽花, 王义祥, 翁伯琦, 等. 土壤水分胁迫对圆叶决明叶片含水量和光合特性的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(Suppl): 28–31.
REN Li-hua, WANG Yi-xiang, WENG Bo-qi, et al. The Effect of water stress on the water content and photosynthesis of leaves of *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2005, 44(Suppl): 28–31.
- [11] 翁伯琦, 江福英, 方金梅, 等. 圆叶决明对低温胁迫的生理响应及施 Ca^{2+} 预防效果的研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(Suppl): 22–27.
WENG Bo-qi, JIANG Fu-ying, FANG Jin-mei, et al. Physiology respond of chilling stress and effect of spray Ca^{2+} on *Chamaecrista rotundifolia*[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2005, 44(Suppl): 22–27.

- [12] 黄东风, 翁伯琦, 熊德中, 等. 圆叶决明硼胁迫症状及施硼效应研究[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 8-14.
HUANG Dong-feng, WENG Bo-qi, XIONG De-zhong, et al. Symptoms of boron stress on *Chamaecrista rotundifolia* and effects of applying boron fertilize[J]. *Acta Pratacuturae Sinica*, 2008, 17(1): 8-14.
- [13] 陈剑侠, 姜能座, 杨冬雪, 等. 福建省茶园土壤中重金属的监测与评价[J]. 茶叶科学技术, 2009(3): 26-29.
CHEN Jian-xia, JIANG Neng-zuo, YANG Dong-xue, et al. The monitoring and evaluation of the soil metal in tea garden of Fujian [J]. *Tea Science and Technology*, 2009(3): 26-29.
- [14] Baker A J M. Accumulators and excluders -Strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3: 643-654.
- [15] Perfus B L, Leonhardt N, Vavasseur A, et al. Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs[J]. *The Plant Journal*, 2002, 32: 539-548.
- [16] 关 丽, 刘湘南. 镉污染胁迫下水稻生理生态表征高光谱识别模型[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 488-493.
GUAN Li, LIU Xiang-Nan. Hyperspectral recognition models for physiological ecology characterization of rice in Cd pollution stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 488-493.
- [17] Pereira G J G, Molina S M G, Lea P J, et al. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalariajuncea*[J]. *Plant and Soil*, 2002, 239: 123-132.
- [18] Mi Y L, Hyun W S. Cadmium-induced changes in antioxidant enzymes from the marine alga *Nannochloropsis oculata*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15: 13-19.
- [19] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13: 468-474.
- [20] 杨 勇, 王 巍, 江荣风, 等. 超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2732-2737.
YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2732-2737.

致谢: 路易斯安那州立大学植物、环境和土壤科学学院 (School of Plant, Environmental and Soil Sciences, Louisiana State University) 朱远达博士对本文英文摘要进行修改, 在此表示感谢。