

Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响

秦 丽, 祖艳群, 李 元

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:通过水培试验,研究了不同 Cd 浓度(0.5、10、20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对续断菊生长形态(株高、叶面积、根长)、生理指标(叶绿素、丙二醛、膜透性)及生物量的影响。结果表明:随着镉浓度的增加,续断菊的株高先增加后减小,根长先减小后增加,叶面积和生物量不断减小;低浓度的镉处理促进植物的生长,而 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理 30 d 时植株的株高、叶面积、根长和生物量分别比对照降低了 18%、46%、42% 和 66%;随着镉处理浓度的升高,续断菊叶片中叶绿素 a、b、总叶绿素和胡萝卜素含量均下降,20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理 30 d 时总叶绿素比对照降低了 58%,丙二醛增加 2.4 倍,细胞膜透性增大 2.3 倍。

关键词: Cd; 续断菊; 生理; 生长形态

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2010)增刊-0048-05

Effects of Cd on the Physiological Characteristics and Growth of the *Sonchus asper* L. Hill

QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Solution culture was carried out to study the effects of cadmium on the growth (plant height, leaf area, root length and biomass) and physiological indicators (chlorophyll, malondialdehyde (MDA), membrane permeability) of *Sonchus asper* L. Hill. The result shows that: The biomass, plant height, leaf area and root length were increased with low Cd concentration treatment. The biomass, plant height, leaf area and root length decreased by 18%, 46%, 42% and 66% with 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd treatment comparing with CK in 30 days, respectively. At the same time, contents of chlorophyll a and b, total chlorophyll and carotene decreased with increase of Cd concentration. Total chlorophyll decreased by 58%, MDA and membrane permeability increased 2.4 times and 2.3 times with 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd treatment comparing with CK in 30 days, respectively.

Keywords: Cd; *Sonchus asper* L. Hill.; physiological characteristics; growth

镉(Cd)是毒性最强的重金属之一,与其他植物生长的非必需元素相比,镉具有更强的从土壤向植物迁移的能力^[1]。土壤中镉含量过多会对植物产生严重损害,表现为抑制植株的生长,引起植物失绿和叶绿素总量的下降,丙二醛含量上升,细胞膜透性增大^[2-6]。高浓度的镉使超累积植物龙葵积累大量的MDA,而龙葵作为超累积植物对镉胁迫表现出一定的耐性和适应性^[7]。

修复重金属污染的土壤,提高生产力,已成为我国农业可持续发展亟待解决的问题^[8]。在对镉污染土壤修复的研究中,目前关注最多的是遏蓝菜属(*Thlaspi caenclensis*)和印度芥菜(*Brassica juncea*)^[9],然而由于植物本身的地域性,在我国境内寻找并研究镉超富集植物,对于修复重金属镉污染的土壤具有重要的意义。续断菊(*Sonchus asper* L. Hill)是新近发现的一种Cd的超积累植物^[10],室外盆栽试验结果表明,续断菊吸收的Cd容易在其地上部积累,并且植物生长未受到抑制^[11]。研究不同浓度Cd水平对续断菊生长形态和生理指标的影响,探讨其对Cd的累积和耐性机理,对于Cd污染土壤的植物修复研究具有重要的理论和实践意义。

收稿日期:2009-09-09

基金项目:国家自然科学基金(30560034)

作者简介:秦 丽(1977—),女,讲师,主要从事土壤重金属污染与修复生态学方面的教学与研究工作。

E-mail: qinli29752001@yahoo.com.cn

通讯作者:祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

1 材料与方法

续断菊(*Sonchus asper* L. Hill)种子采自会泽 Pb/Zn 矿区。播种前种子用 10% 的 H_2O_2 消毒 30 min, 使用烤烟基质和漂盘育苗, 待苗长到 6~7 cm 高时, 选择长势良好, 大小均一的幼苗移入装有 2 L 营养液的塑料盆中进行水培试验(4 株·盆⁻¹), 以 1/4 营养液培养 4 d、1/2 营养液培养 4 d, 此后进行全营养液试验, 完全营养液组成为: $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 1.18 g·L⁻¹, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.49 g·L⁻¹, KNO_3 0.51 g·L⁻¹, KH_2PO_4 0.135 g·L⁻¹, K_2SO_4 0.44 g·L⁻¹, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.000 4 g·L⁻¹, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.001 1 g·L⁻¹, H_3BO_3 0.024 3 g·L⁻¹, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.009 05 g·L⁻¹, $H_2MO_4 \cdot H_2O$ 0.000 45 g·L⁻¹。每 4 d 更换一次营养液, 连续通气, 并用 0.1 mmol·L⁻¹ NaOH 调节 pH 为 5~8, 12 d 后加入 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$, 使 Cd 浓度分别为 0、5、10、20 mg·L⁻¹, 每个处理 3 次重复。

在处理第 10、20、30 d 分别测定标记植物的株高、叶面积和根长, 同时取相同位置的功能叶片测定叶绿素含量和细胞膜透性。形态指标测定采用常规方法, 叶绿素用丙酮浸提, 分光光度法测定; 丙二醛用硫代巴比妥酸浸提, 分光光度法测定; 细胞膜透性用相对电导率表示, 采用电导法进行测定。30 d 后收获所有植株, 将地上部及根部分开, 根用去离子水冲洗干净, 再将根及地上部组织烘干、称重。

数据采用 Excel 进行常规分析, 利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性测验。相关性分析采用 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 Cd 对续断菊生长形态的影响

随着 Cd 处理浓度的提高, 续断菊的株高呈先增加后减小的变化趋势。与对照相比, 10 d 时不同浓度的 Cd 处理均使续断菊的株高显著增加。20 d 和 30 d 时 Cd 为 5 mg·L⁻¹ 和 10 mg·L⁻¹ 使续断菊的株高显著增加, 而 Cd 20 mg·L⁻¹ 抑制了植株的生长; 在不同时期, 10 mg·L⁻¹ Cd 处理植株长势最好, 株高最高, 3 个时期分别比对照增长了 116%、125% 和 114% (表 1)。20 mg·L⁻¹ 处理时, 与对照相比, 除 20 d 时株高变化率为 13.4%, 其他 3 个时期均使株高降低, 变化率分别为 -6.5%、-11.1% 和 -17.8%, 其中 30 d 的降低幅度最大。

随着 Cd 浓度的增加和时间的延长, 续断菊的叶面积均呈先增加后减小的趋势(表 1)。20 d 时 10 mg·L⁻¹ Cd 处理下植株的叶面积最大, 为 52.2 cm², 比对照增长了 1.7 倍。与对照相比, 10 d 时续断菊叶面积变化率分别为 43.0%、78.5% 和 -23.1%, 20 d 时变化率最小, 分别为 10.2%、17.4% 和 -13.1%。

3 个生长时期, 续断菊根长均在 10 mg·L⁻¹ Cd 处理下最大, 分别比对照增长了 1.2、1.7 和 1.2 倍(表 1)。

2.2 Cd 对续断菊生物量的影响

不同浓度的 Cd 处理下, 续断菊地上部分、地下部分的生物量均随 Cd 浓度的增加而减小(图 1)。与对照相比, 5 mg·L⁻¹ Cd 处理下, 续断菊地上部和地下部的生物量显著降低了 47% 和 31%; 而 10 mg·L⁻¹ Cd 处理时分别减小了 73% 和 65%; Cd 为 20 mg·L⁻¹ 时生物量分别显著减小了 76% 和 79%。

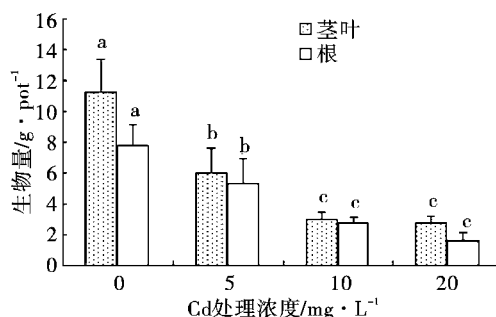


图 1 Cd 对续断菊生物量的影响

Figure 1 Effects of Cd on the biomass of *Sonchus asper* L. Hill

2.3 Cd 对续断菊生理指标的影响

2.3.1 Cd 对续断菊叶片叶绿素含量的影响

Cd 处理对续断菊叶绿素 a、b 及胡萝卜素含量均有影响(表 2)。随着 Cd 浓度的增加, 续断菊叶片中叶绿素 a、b 和总叶绿素含量均呈下降的趋势; 随着时间的延长, 总叶绿素含量呈先增加后减小的变化趋势。20 d 时, 随着 Cd 浓度的增加, 叶绿素 a 的含量显著降低($P < 0.05$); 30 d 时总叶绿素含量随着 Cd 浓度的增加显著降低($P < 0.05$)。与对照相比, 30 d 20 mg·L⁻¹ 时叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素分别比对照降低了 62%、44% 和 58%。胡萝卜素的含量随着 Cd 浓度的增加显著降低[10 d 除外, 10 d 时 4 个处理间无显著性差异($P > 0.05$)], 随着时间的后延, 胡萝卜素呈先增加后降低的变化趋势; 20 mg·L⁻¹ Cd 处理 20 d 时胡萝卜素比对照降低了 46%。

表 1 镉对续断菊不同生长时期的数量性状的影响

Table 1 Effect of Cd on the quantitative character of *Sonchus asper* L. Hill in different stages

镉浓度/ mg · L ⁻¹	株高/cm			叶面积/cm ²			根长/cm		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
0	12.7 ± 1.1c	13.9 ± 0.9bc	14.4 ± 1.2b	12.1 ± 1.9c	23.6 ± 4.0a	31.4 ± 2.1b	14.8 ± 0.4b	14 ± 0.8c	13 ± 0.7b
5	13.5 ± 0.7b	14.3 ± 1.1b	14.8 ± 0.9b	17.3 ± 9.6b	26.0 ± 3.6a	35.5 ± 2.8b	11 ± 1.0c	13.7 ± 0.4c	11.7 ± 0.5c
10	14.7 ± 0.7a	17.4 ± 0.9a	16.4 ± 0.8a	21.6 ± 9.0a	27.7 ± 7.0a	52.2 ± 2.7a	17.7 ± 0.6a	24.4 ± 0.6a	15.4 ± 0.5a
20	14.4 ± 0.7a	13.0 ± 0.9c	12.8 ± 1.3c	9.3 ± 2.3c	20.5 ± 4.6a	22.1 ± 5.4c	12.2 ± 0.4c	16.6 ± 1.2b	13.1 ± 0.7b

注:表中数据为(平均值±标准差)。同一列的不同字母表示用 Duncan 法测试时 5% 水平上的差异性显著。下同。Notes: Results are means ± SE. The same letter in the same column meant no significant differences between the treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

表 2 Cd 处理对续断菊不同时期叶绿素和胡萝卜素含量的影响

Table 2 Effects of Cd on contents of chlorophyll and carotene of the *Sonchus asper* L. Hill in different growth stages

时间	镉浓度/mg · kg ⁻¹	叶绿素 a/mg · g ⁻¹	叶绿素 b/mg · g ⁻¹	总叶绿素/mg · g ⁻¹	叶绿素 a/b 值	胡萝卜素/mg · g ⁻¹
10 d	0	0.30 ± 0.010a	0.10 ± 0.008a	0.39 ± 0.007a	3.13 ± 0.17b	0.16 ± 0.013a
	50	0.26 ± 0.004b	0.08 ± 0.003b	0.35 ± 0.002b	3.12 ± 0.15b	0.10 ± 0.006a
	100	0.25 ± 0.010b	0.08 ± 0.003b	0.34 ± 0.012b	3.26 ± 0.11ab	0.09 ± 0.005a
	200	0.22 ± 0.005c	0.05 ± 0.002c	0.27 ± 0.012c	3.99 ± 0.52 a	0.08 ± 0.060a
20 d	0	1.08 ± 0.007a	0.33 ± 0.021a	1.41 ± 0.014a	3.28 ± 0.22b	0.52 ± 0.042a
	50	0.94 ± 0.056b	0.24 ± 0.018b	1.18 ± 0.063b	3.97 ± 0.32 b	0.44 ± 0.025b
	100	0.86 ± 0.019c	0.22 ± 0.020b	1.09 ± 0.036b	3.87 ± 0.31b	0.39 ± 0.013b
	200	0.76 ± 0.007d	0.15 ± 0.003c	0.91 ± 0.006c	4.88 ± 0.12 a	0.28 ± 0.002c
30 d	0	0.93 ± 0.058a	0.27 ± 0.027a	1.20 ± 0.035a	3.48 ± 0.52a	0.38 ± 0.009a
	50	0.64 ± 0.025b	0.23 ± 0.018ab	0.87 ± 0.034b	2.78 ± 0.21Ab	0.34 ± 0.002b
	100	0.56 ± 0.030b	0.19 ± 0.006bc	0.75 ± 0.036c	2.97 ± 0.08Ab	0.25 ± 0.010c
	200	0.35 ± 0.023c	0.15 ± 0.013c	0.50 ± 0.031d	2.45 ± 0.20b	0.14 ± 0.014d

2.3.2 Cd 对续断菊叶片丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物,其含量可用于表示细胞内的活性氧的水平和膜脂过氧化的程度。10 d时随着 Cd 处理浓度的增加(5 mg · L⁻¹除外),续断菊叶片中 MDA 含量显著升高($P < 0.05$),与对照相比,3 个处理下 MDA 含量分别增加了 1.0、1.4 和 1.6 倍;20 d 的变化与 10 d 的相似,3 个处理下 MDA 含量分别比对照增加了 1.4、1.7 和 2.0 倍;30 d 时续断菊叶片中 MDA 含量随 Cd 浓度的增加呈增大的变化趋势,20 mg · L⁻¹的 Cd 处理使 MDA 含量显著高于其他处理($P < 0.05$),与对照相比,植株叶片中 MDA 含量分别增加了 1.1、1.4 和 2.4 倍(图 2)。

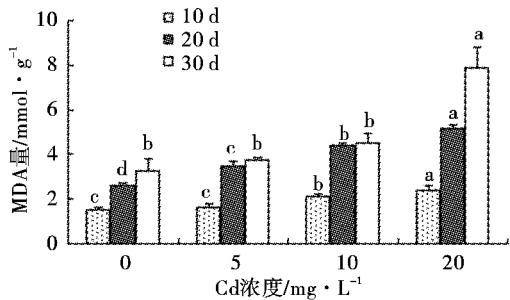


图 2 镉对续断菊丙二醛含量的影响

Figure 2 Effects of Cd on MDA of *Sonchus asper* L. Hill

2.3.3 Cd 对续断菊叶片膜透性的影响

随着 Cd 浓度的提高,3 个生长期续断菊细胞膜透性均增加(图 3),且在 3 个生长期,20 mg · L⁻¹ Cd 处理下,续断菊细胞膜透性均比对照极显著增长了 1.8、2.0 和 2.3 倍。随着时间的延续,续断菊细胞膜透性也显著增加($P < 0.05$),Cd 浓度为 5、10 和 20 mg · L⁻¹处理条件下,30 d 时分别比 10 d 时增加了 1.6、1.9 和 2.3 倍。

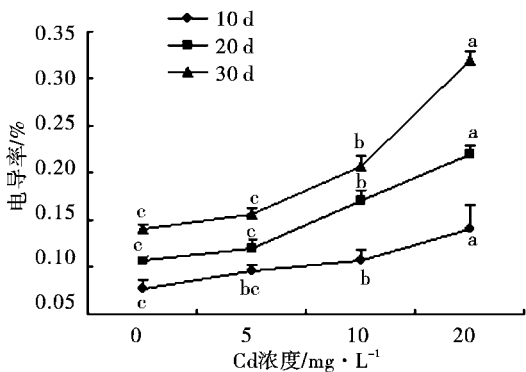


图 3 镉对续断菊膜透性的影响

Figure 3 Effects of Cd on membrane permeability of *Sonchus asper* L. Hill

3 讨论

虽然镉不是植物生长的必需元素,但是当镉在环境中积累到一定高的水平时,镉很容易被植物的根系吸收,并可能转运到植物的地上部分^[12-13]。相关研究表明,不同浓度的镉对植物生长产生不同的影响,其中低浓度的镉处理促进了植物的生长,高浓度镉对植物生长有明显的抑制作用^[14]。王志坤等(2006)的研究结果表明,镉胁迫使大豆的株高和硝酸还原酶的活性明显降低,镉胁迫降低了大豆幼苗的株高,影响了大豆的生长^[15]。在镉胁迫下,玉米幼苗的生长发育受到抑制,且随着镉处理浓度增加和时间延长,幼苗生长受抑制程度增大^[4]。在镉胁迫下,植物生长发育受到抑制,同时低浓度的镉对作物在幼苗期的生长有促进作用,浓度过高对作物在幼苗期的生长则有明显的抑制作用^[14]。本试验结果表明,低浓度的镉处理促进了续断菊的生长,高浓度镉对植物生长有明显的抑制作用,作为一种镉的超累积植物,续断菊对镉具有一定的耐性,当镉浓度超过一定限值时也会抑制植株的生长发育。

叶绿素含量高低将直接影响光合作用的强弱及物质合成速率的高低,镉能通过降低叶绿素的含量、改变叶绿体的超微结构、抑制与光合作用有关的酶活性等途径影响光合作用^[16]。重金属胁迫可引起植物叶片褪绿及叶绿素含量的下降,其原因可能是重金属影响了叶绿素生物合成的相关酶活性和抑制了叶绿素的合成,也可能是重金属胁迫下活性氧自由基作用,使叶绿体结构功能遭破坏或叶绿素分解。叶绿素是植物光合作用的基础物质,叶绿素a、b含量及其比值是衡量叶片衰老的重要指标,如叶绿素a比叶绿素b下降得更快,即叶绿素a/b变小,表示叶片在加速老化^[17]。本研究中,镉处理对续断菊叶片叶绿素a、b含量均有影响,在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,叶绿素a含量与对照相比有显著差异($P<0.05$),在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,叶绿素a、b含量与对照相比均有显著差异($P<0.05$)。不同浓度的镉胁迫下,续断菊叶片中总叶绿素含量均显著降低。与对照相比,叶绿素的降低率分别为2.5%、23.1%和31.4%。表现为随着镉浓度的增大,植株叶片的光合作用系统受到破坏,植株受到严重伤害,叶绿素含量降低。其原因可能是重金属离子的积累抑制叶绿素酸酐还原酶和影响氨基-r-戊酮酸的合成,从而影响叶绿素的生物合成;同时使叶绿体膜系统在结构上受到破坏,导致叶绿素总量下降。与对照相比, $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下,续断菊

叶片中总叶绿素含量下降不显著,3个镉浓度下, $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}$ 处理时,叶绿素含量变化也不显著。可见,续断菊有很强的耐镉能力,低浓度的镉对植株叶片的光合作用系统的破坏不明显。此外,根分泌的粘胶物质与根际中的 Cd^{2+} 络合,形成稳定的螯合体,将污染物固定在土壤中,而使高浓度的镉对续断菊的毒害作用不大。

在植物遭受逆境胁迫或衰老过程中,细胞内活性氧产生与清除的平衡会遭到破坏,引起自由基的积累和膜质过氧化,使膜系统结构和功能遭到损伤,造成植物细胞伤害^[18]。丙二醛(MDA)是膜质过氧化的产物,其含量可反应膜质过氧化的程度,是植物膜系统受伤害的重要指标之一,反应植物衰老或遭受逆境伤害的程度。本试验结果表明,同一时期续断菊叶片中MDA含量,随着镉浓度升高而显著升高,说明镉胁迫可诱导活性氧产生,并使植株出现氧化损伤症状。不同镉处理下植株叶片中MDA含量分别比对照增加了27.4%、52.0%和60.9%,可见镉处理对续断菊产生明显的毒害。

随着镉浓度的提高,细胞膜透性增加。当植物受到镉胁迫时,其选择透性机能受损,膜透性增大,使细胞内一些可溶性物质外渗,破坏了细胞内酶及代谢作用原有的区域性,这是续断菊受害的原因之一。镉胁迫下植物体内发生一系列生理变化,引起自由基的积累和膜脂过氧化,使膜系统的结构和功能受到损伤和破坏,透性增大,抑制细胞和整个植株的生长,造成植物矮化,生长迟缓。

4 结论

(1)低浓度的Cd处理促进了植物的生长,其中 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下,续断菊的株高、叶面积、根长和生物量在各个时期均为最大,而 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}$ 处理对植物生长有明显的抑制作用,30 d时植株的株高、叶面积、根长和生物量分别比对照降低了18%、46%、42%和66%。

(2)随着Cd处理浓度的升高,续断菊叶片中叶绿素a、b、总叶绿素和胡萝卜素含量均下降,30 d $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}$ 处理时总叶绿素比对照降低了58%;MDA含量和细胞膜透性均随Cd浓度的升高而增加, $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Cd}$ 处理30 d,使MDA比对照增加2.4倍,细胞膜透性增大2.3倍。

参考文献:

- [1] Sataru S, Baker J R, Urbenjapol S, et al. Global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population

- [J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137: 65 - 83.
- [2] 方晓航, 曾晓雯, 于方明, 等. 镉胁迫对白菜生理特征及元素吸收的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 25 - 29
FANG Xiao - hang, ZENG Xiao - wen, YU Fang - ming, et al. Physiological characteristic and uptake of Cd, nutritious elements in cabbage grown on Cd - contaminated soils[J]. *Journal of Agro - Environment Science*, 2006, 25(1): 25 - 29.
- [3] 于方明, 仇荣亮, 汤叶涛, 等. 镉对小白菜生长及氮素代谢的影响研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(2): 506 - 511.
YU Fang - ming, CHOU Rong - liang, TANG Ye - tao, et al. Effects of cadmium on the growth and nitrogen metabolism in *Brassica chinensis* [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2): 506 - 511.
- [4] 刘建新. 镉胁迫对玉米幼苗生理生态的变化[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 265 - 268.
LIU Jian - xin. Physiological and ecological responses of maize seedlings to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 265 - 268.
- [5] 高家合, 王树会. 镉胁迫对烤烟生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1167 - 1170.
GAO Jia - he, WANG Shu - hui. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of flue - cured tobacco[J]. *Journal of Agro - Environment Science*, 2006, 25(5): 1167 - 1170.
- [6] 张超兰, 陈文慧, 韦必帽, 等. 几种湿地植物对重金属镉胁迫的生理生化响应[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1458 - 1461.
ZHANG Chao - lan, CHEN Wen - hui, WEI Bi - mao, et al. Response of physiology and biochemistry of plants in wetland to heavy metal cadmium stress[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1458 - 1461.
- [7] 唐秀梅, 龚春风, 周主贵, 等. 镉对龙葵根系形态及部分生理指标的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1462 - 1465.
TANG Xiu - mei, GONG Chun - feng, ZHOU Zhu - gui, et al. Effect of cadmium on root morphology and partial physiological indexes of *Solanum Nigrum* L. [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1462 - 1465.
- [8] Zu Yanqun, Li Yuan, Chen Jianjun, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead - zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31: 755 - 762.
- [9] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苋菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 及其对 Cd 的富集特征[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1386 - 1389.
LI Yu - shuang, SUN Li - na, SUN Tie - heng, et al. Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics[J]. *Journal of Agro - Environment Science*, 2007, 26(4): 1386 - 1389.
- [10] Zu Y Q, Li Y, Schwartz C. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead - zinc mine area, China [J]. *Environment International*, 2004, 30: 567 - 576.
- [11] 李 元, 方其仙, 祖艳群. 两种生态型续断菊对镉累积特征研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(6): 1150 - 1154.
LI Yuan, FANG Qi - xian, ZU Yan - qun. Accumulation characteristics of two ecotypes *Sonchus asper* (L.) Hill. to Cd[J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2008, 28(6): 1150 - 1154.
- [12] 张玉秀, 于 飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1317 - 1321.
ZHANG Yu - xiu, YU Fei, ZHANG Yuan - ya, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2008, 16(5): 1317 - 1321.
- [13] Ebbs S, Lau I. Phytochelatin synthesis is not responsible for Cd tolerance in Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (J&C Pres) [J]. *Plant*, 2002, 214(4): 635 - 640.
- [14] 王云一, 陈 尧, 钱亚如, 等. 镉胁迫对不同品种小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 767 - 770.
WANG Yun - yi, CHEN Yao, QIAN Ya - ru, et al. Effects of cadmium stress on the seedlings growth and physiological characteristics of different wheat cultivars[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(5): 767 - 770.
- [15] 王志坤, 廖柏寒, 黄运湘, 等. 镉胁迫对大豆幼苗生长影响及不同品种耐镉差异性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1143 - 1147.
WANG Zhi - kun, LIAO Bo - han, HUANG Yun - xiang, et al. Effects of Cd on growth of *Glycine max* seedlings and Cd - tolerance differences of different varieties of *Glycine max*[J]. *Journal of Agro - Environment Science*, 2006, 25(5): 1143 - 1147.
- [16] 李 元, 王焕校, 吴玉树. Cd, Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. *生态学报*, 1992, 12(2): 147 - 153.
LI Yuan, WANG Huan - xiao, WU Yu - shu. Effects of cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(2): 147 - 153.
- [17] 徐勤松, 施国新, 王红霞, 等. 外源亚精胺对槐叶苹耐镉胁迫的增强效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2521 - 2526.
XU Qin - song, SHI Guo - xin, WANG Hong - xia, et al. Roles of exogenous spermidine in improving *Salvinia natans* tolerance towards cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2521 - 2526.
- [18] 汤春芳, 刘云国, 曾光明, 等. 镉胁迫对萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30(4): 469 - 474.
TANG Chun - fang, LIU Yun - guo, ZENG Guang - ming, et al. Effects of cadmium stress on active oxygen generation, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in radish seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(4): 469 - 474.