

长药景天对 Cr、Pb、Cd、Hg、Co 复合污染的生理响应及吸收特征

王 艳¹, 代保清², 辛士刚³, 康艳红¹, 李 娜³

(1.沈阳师范大学化学与生命学院,辽宁 沈阳 110034;2.沈阳市园林规划设计院,辽宁 沈阳 110016;3.沈阳师范大学实验中心,辽宁 沈阳 110034)

摘 要:采用盆栽试验研究了模拟 Cr、Pb、Cd、Hg、Co 复合污染对长药景天生理的影响及其对重金属的吸收。结果表明,在低浓度污染下,长药景天的 CAT 和 SOD 活性显著增高,但在中、高浓度污染下,CAT 和 SOD 活性显著下降。所有浓度梯度污染处理均使 POD 活性下降,叶绿素含量增加,蛋白质含量下降,而可溶性糖含量无变化。MDA 含量在高浓度污染胁迫下显著升高。随土壤中重金属含量的增加,长药景天根系中重金属含量增加,但 Cr 和 Pb 向地上部分迁移很少,而 Cd、Hg 和 Co 向地上部分迁移的能力较强,其中低浓度污染条件下,根、叶、果穗中 Hg 的富集系数都在 1 以上,Hg 含量以叶片中最高,其次是果穗。长药景天对 Co 的富集能力较强,在轻、高污染条件下,其根、叶和果穗对 Co 的富集系数均大于 1,长药景天的果穗对几种重金属的富集系数相对较高。

关键词:重金属复合污染;长药景天;生理指标;富集系数

中图分类号:X503.233 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2008)03-1051-06

Physiological Responses and Absorption of Heavy Metals by *Sedum spectabile* Boreau Under the Stress of Combined Heavy Metal Pollution

WANG Yan¹, DAI Bao-qing², XIN Shi-gang³, KANG Yan-hong¹, LI Na³

(1. Chemical and Life Science College of Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; 2. Garden Programming and Designing Institute, Shenyang 110016, China; 3. Experimental Center of Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: The physiological responses and metal absorption in combined treatment of chromium, lead, cadmium, mercury and cobalt by the plant of *Sedum spectabile* Boreau were studied in pot experiments in the experimental garden of Shenyang Normal University, Liaoning province, China. The results showed that CAT and SOD activity increased at low concentration of metal treatment while decreased significantly at medium and high metal concentration treatment. All the treatments with different concentrations could cause the decrease of POD activity, increase of content of chlorophyll and decrease of content of protein. The contents of MDA increased under sever heavy metal stress. No significant difference in content of soluble sugar was obtained. With the increasing of heavy metal, the content of metal in roots increased. Cr and Pb were seldom transported to the aboveground parts after the metal was absorbed by root, Cd, Hg and Co could be easily transported to aboveground parts relatively. The bio-concentration factor (BCF) for Hg in root, leaf and spike was above 1.0 at low concentration treatment and the peak value of the content of Hg existed in leaf. The BCF for Co was above 1 in root, leaf and spike at low and high metal concentration treatment. The BCF for all the metals was relatively high in spike.

Keywords: heavy metal combined pollution; *Sedum spectabile* Boreau; physiological index; bio-concentration factor

环境中重金属污染对生物的危害及重金属污染土壤的生物修复已成为研究的热点,目前对单一重金

属污染的影响和评价很多,而环境中往往是多种金属污染物造成的复合污染,这使得对重金属污染产生的生物影响和生物修复的评价更加复杂,因此关于重金属复合污染对植物的生理、生态影响、生物治理等方面的研究受到很大关注。如孙健等^[10]研究了不同浓度的 Cu、Cd、Zn、Pb、As 复合污染对水稻苗的联合生理毒性效应,发现随着复合重金属污染浓度的增大,水

收稿日期:2007-07-17
基金项目:国家自然科学基金项目(60570445);沈阳师范大学主任基金项目
作者简介:王 艳(1970—),女,辽宁昌图人,博士,副教授,主要从事环境生物学方面的研究。
E-mail:wyancn2002@yahoo.com.cn

稻苗叶片中叶绿素含量急剧减少;丙二醛 (MDA)含量迅速增加;SOD 和 POD 酶活性呈先升后降的变化趋势。黄永杰报道了 8 种水生植物对 Cu、Pb、Cd、Zn 和 Mn 污染的重金属富集能力,发现了几种植物在 Cu、Pb 和 Zn 等重金属复合污染水域的植物治理中有着较大的发展潜力和应用前景^[2]。魏树和等^[12]研究了多种杂草对重金属的富集,发现龙葵 (*Solanum nigrum*)对 Cd 的富集符合超积累植物的基本特征。从目前已发表的研究报道看,重金属复合污染的研究对象主要集中在农作物和杂草等生物类群,关于花卉植物研究得较少^[7]。花卉植物在美化环境的同时,有些种类也可能在污染监测与治理方面发挥一定的作用,因此对园林植物进行研究和筛选,使其能在污染比较严重的城市等环境中应用,将会发挥重要的生态、社会 and 经济效益。因此,把花卉植物与污染环境治理、修复联系起来,具有非常重要的现实意义。

长药景天 (*Sedum spectabile* Boreau)为景天科植物,是一种应用较广泛的观赏植物,本研究以长药景天为材料,探讨其在不同程度重金属复合污染条件下的反应,从而揭示重金属复合污染对其伤害机理及其对重金属的吸收能力,同时探讨其在重金属复合污染区域的应用价值,从而为开展多年生花卉植物在重金属复合污染环境中的应用提供参考,并指导生产实践,因此该研究具有一定的理论价值和现实意义。

1 材料和方法

将 1 kg 试验用土壤装于直径为 18 cm、深 12 cm 的花盆中。该试验用土为人工配制的重金属污染土壤,该土壤放于直径 1 m、深约 30 cm 的塑料大盆中,在沈阳师范大学实验园中 (N41°54′,E123°24′,海拔为 50 m)已进行了 2 年的重金属的形态变化及迁移行为研究。用于本研究时,各处理土壤中重金属含量如表 1 所示。从表 1 可见,除了 Co 含量外,土壤中 Cr、Pb、Hg、Cd 含量依次增加,因此,污染土壤的梯度可划分为轻度复合污染、中度复合污染、重度复合污染,同时

设对照。

土壤经消化后,各种元素含量利用电感耦合等离子体 (ICP-AES,美国 IEEMAN)测定。

于 2006 年 5 月初在不同的土壤上栽植高度和长势一致的三年生长药景天植株,每盆栽 2 株,各处理重复 3 次。植物栽植后将盆埋入土壤中,花盆边缘高于土壤面 0.5 cm,在实验园中统一管理,于 8 月初取叶片进行各项生理指标的测定,9 月下旬将植物连盆取出,在实验室内连根取下植物,分别测定根、茎、叶、果穗中的各种重金属含量。

生理指标测定方法:采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈伤木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,可溶性糖采用蒽酮法,蛋白质含量采用考马斯亮蓝法^[19];紫外分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[17];硫代巴比妥酸显色法测定丙二醛(MDA)含量,乙醇-丙酮浸提法测定叶绿素含量^[18]。

重金属含量分析:用自来水将植物上的泥土清洗掉,再用去离子水冲洗 3 次,然后在 105 ℃下杀青 30 min,在 80 ℃下于烘箱中烘至恒重。取 0.5 g 样品于聚四氟乙烯高压罐中,加入 5 mL 浓硝酸置于在 140 ℃恒温烘箱中高压消化 8 h,消化后的样品为黄色清亮溶液,冷却后,去离子水定容至 25 mL^[11],利用电感耦合等离子体 (ICP-AES,美国 IEEMAN)测定。每处理重复 3 次。

数据分析:采用方差分析 (One-way ANOVA)的 LSD 多重比较检验进行差异显著性检验,并计算植株各部分对重金属的富集系数 (BCF=植物样品中重金属浓度/土壤中重金属浓度)。

2 结果与分析

2.1 重金属复合污染对长药景天生理指标的影响
 正常情况下,植物体内活性氧的产生与清除之间存在动态平衡,主要是依靠抗氧化防御系统酶 POD、SOD 和 CAT 清除活性氧的作用。本结果表明,重金属

表 1 各处理土壤重金属浓度 (mg·kg⁻¹)
 Table 1 Heavy metal concentration in soils of each treatment (mg·kg⁻¹)

处理	CK	轻度	中度	重度
Cr	未检出	14.72± 13.02	15.58±11.56	18.01± 7.9
Pb	未检出	31.8± 12.39	59.21± 9.44	79.28± 24.21
Hg	56.78± 7.26	58.26± 12.39	115.41± 5.87	115.71± 19.12
Cd	0.48± 0.48	1.53± 0.49	1.76± 0.5	2.37± 3.46
Co	21.31± 1.97	25.42± 2.09	43.74± 3.14	16.21± 13.01

混合污染对长药景天的抗氧化防御系统酶产生了明显的影响 (表 2)。在所有梯度的重金属复合污染下, POD 活性降低, 尤其是在中度和重度污染时 POD 活性下降显著, SOD 活性在轻度复合污染时增强, 与其他处理差异均显著, 而在中度和重度混合污染条件下活性显著降低, 与对照差异不显著。CAT 活性在轻度复合污染下活性显著增高, 而在中度和重度复合污染下, 活性显著下降, 各处理间差异均达显著水平。

在环境污染胁迫下, 抗氧化防御系统酶活性的下降可导致活性氧含量增加, 植物因脂质过氧化而出现 MDA 的积累。因此, MDA 含量增加说明植物受到了过氧化损害。在轻度和中度污染条件下, 长药景天 MDA 含量未增加, 而在重度复合污染条件下, 长药景天 MDA 含量增加较明显, 与中度污染处理差异显著 ($P<0.05$), 说明在重度复合污染条件下, 长药景天体内的自由基积累, 导致脂质过氧化加强。

一般, 植物可溶性糖含量在逆境胁迫下增加, 它可结合进入体内的重金属, 使重金属被固定, 从而减少对植物的损害, 而长药景天的可溶性糖含量在各处理中基本没有变化(表 2), 说明长药景天没有这种抵御重金属侵害的机制。从表 2 还可看出, 随重金属胁迫程度加重, 长药景天蛋白质含量有下降趋势, 尤其是在重度污染时下降显著。而叶绿素含量呈增加趋势, 在轻度污染条件下与对照差异极显著 ($P<0.01$), 重度污染处理与 CK 差异显著, 轻度和中度处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 长药景天对重金属吸收的分析

长药景天对各种重金属的吸收情况见表 3。

从表 3 可见, 长药景天根系中 Cr 含量随土壤中 Cr 含量升高而呈升高趋势, 但处理间差异不显著, 吸收的 Cr 主要集中在根部, 向地上部分迁移较少, 轻度复合污染条件下地上部分未检出 Cr, 仅在中度和重度复合污染条件下才有少部分向地上部迁移。中度复

合污染处理中长药景天的茎中有一定含量的 Cr, 而重度复合污染处理茎和果穗中均有 Cr, 且果穗中含量很高。

长药景天根系中 Pd 随土壤中 Pd 浓度增加而增加, 以重度复合污染含量最高, 与其他处理差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。它对 Pd 的吸收也主要集中于根部, 向地上部分迁移较少。只有重度复合污染处理茎和果穗中检出 Pd, 而且与 Cr 相似, 也是果穗中 Pb 含量较高。黎佳佳报道辣椒对 Pb 的吸收集中在根部, 难于向果实转移^[6]。王新等^[13]对水稻的研究表明, Pb 元素大部分积累于水稻根部, 以上研究结果与本研究结果相似。

从表 3 可见, 随土壤中 Cd 含量增加, 长药景天根系中 Cd 含量呈递增趋势, 但各处理根系间差异不显著。与 Cr 和 Pb 不同的是, 长药景天吸收的 Cd 均能向地上部分迁移。王新等^[13]对水稻的研究表明, Cd 比 Pb 元素易向地上部迁移, 与本研究结果相似。长药景天茎、叶中 Cd 含量以重度复合污染处理最高。果穗中 Cd 含量也以重度复合污染处理最高, 与其他处理差异达极显著水平 ($P<0.01$), 从根系对 Cd 的富集系数看, 随土壤中 Cd 含量降低富集系数变大, 其中对照根系对 Cd 的富集系数达到 2.13, 说明长药景天对 Cd 的相对富集能力有随土壤中 Cd 含量降低而增强的趋势。

长药景天根系吸收 Hg 后向地上部分迁移能力较强, 植物体各部分 Hg 含量基本是随土壤中 Hg 含量的升高而增加。从富集系数角度看, 在轻度污染条件下, 除了茎的富集系数为 0.93 外, 其他部分的富集系数均达到了 1 以上, 尤其是叶片的富集系数最高, 其次是果穗, 说明在轻度复合污染条件下, 长药景天对 Hg 的富集能力较强。在中度和重度胁迫处理下, 长药景天的叶中 Hg 含量均超过茎和果穗, 富集系数也最大。

表 2 重金属混合污染胁迫下长药景天生理指标的变化
Table 2 Physiological indexes of *Sedum spectabile* Boreau under the metal stress

项目	CK	1	2	3
POD/ $\Delta OD_{470} \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$	0.98±0.16 a	0.68±0.15 a	0.62±0.030 b	0.58±0.045 b
SOD/ $U \cdot g^{-1}FW \cdot h^{-1}$	148.06±51.58 ab	313.22±95.67 a	44.35±6.15 b	48.87±23.37 b
CAT/ $\Delta OD_{240} \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$	0.013±0.001 b	0.035±0.001 a	0.007±0.001 c	0.002±0.000 7 d
MDA/nmol $\cdot g^{-1}$	27.96±7.96 ab	24.73±1.30 ab	24.90±3.19 b	35.00±2.51 a
蛋白质/ $\mu g \cdot g^{-1}$	611.64±14.79 a	563.96±23.27 a	576.14±4.43 a	396.52±59.07 b
可溶性糖/ $\mu g \cdot g^{-1}$	0.035±0.000 16 a	0.035±0.000 45 a	0.035±0.000 41 a	0.035±0.000 11 a
叶绿素总量/mg $\cdot g^{-1}$	0.021±0.004 5 c	0.090±0.080 a	0.030±0.003 1 bc	0.068±0.029 ab

注: 同一行中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 不同。

表 3 长药景天各部位重金属含量 (mg·kg⁻¹)

Table 3 Heavy metal contents in each part of *Sedum spectabile* Boreau (mg·kg⁻¹)

处理	部位	CK	轻度	中度	重度
Cr	根	未检出	2.78±1.83a	2.80±0.82a	3.52±2.61a
	BCF		0.19	0.18	0.20
	茎	未检出	未检出	0.68±1.01b	0.95±0.00 a
	BCF			0.04	0.05
	叶	未检出	未检出	未检出	未检出
	果穗	未检出	未检出	未检出	2.19±0.17
	BCF			0.000 6	0.12
Pb	根	未检出	8.9±4.44c	19.77±10.31b	46.20±3.44a
	BCF		0.28	0.33	0.58
	茎	未检出	未检出	未检出	13.47±11.96
	BCF				0.17
	叶	未检出	未检出	未检出	未检出
	果穗	未检出	未检出	未检出	23.05±8.81
	BCF			0.00	0.29
Hg	根	40.03±15.47c	58.26±6.48b	64.52±14.91a	63.14±4.01a
	BCF	0.71	1.0	0.56	0.55
	茎	42.3±0.59c	54.14±5.8b	85.32±1.73a	73.74±5.08a
	BCF	0.74	0.93	0.74	0.64
	叶 leaf	50.75±7.93d	65.62±1.08c	92.42±3.11a	86.20±8.65
	BCF	0.89	1.13	0.80	0.74
	果穗	55.48±0.03c	60.28±4.19b	71.11±0.03a	69.90±10.33a
	BCF	0.98	1.03	0.62	0.60
Cd	根	1.01±1.06a	1.12±0.64a	1.30±0.18a	1.59±0.78a
	BCF	2.10	0.73	0.74	0.67
	茎	0.01±0.00b	0.50±0.41b	0.50±0.36b	1.39±0.45a
	BCF	0.02	0.33	0.28	0.59
	叶	0.18±0.07c	0.69±0.3b	0.63±0.10bc	1.85±0.15a
	BCF	0.38	0.45	0.38	0.78
	果穗	0.08±0.02c	0.67±0.18b	0.60±0.00c	2.32±0.66a
	BCF	0.17	0.44	0.34	0.98
Co	根	18.02±7.4c	25.42±2.09b	41.86±2.08a	16.33±1.60d
	BCF	0.85	1.00	0.96	1.01
	茎	18.74±0.35ab	29.05±1.45a	35.39±1.65a	15.75±1.26b
	BCF	0.88	0.57	0.81	0.97
	叶	14.56±2.00c	28.29±0.89b	37.01±0.99a	17.73±0.47d
	BCF	0.68	1.11	0.85	1.09
	果穗	14.56±2.00d	26.19±0.53a	25.43±0.52b	16.46±2.71c
	BCF	0.68	1.03	0.58	1.02

长药景天根系和叶中 Co 含量随土壤中含量增加而增加,各处理间的差异均极显著 ($P<0.01$)。各处理间果穗中 Co 含量差异也达到达显著水平 ($P<0.05$)。长药景天对 Co 的富集能力较强,在轻度和重度复合污染条件下,其根、叶和果穗对 Co 的富集系数均大于 1,长药景天的果穗对几种重金属的富集能力较强。

综上所述,随土壤中重金属含量增加,长药景天对 Cr 和 Pb 的吸收呈增加趋势,但主要集中在根部,

向地上部分迁移很少,各部分富集系数较低。长药景天对 Cd 和 Hg、Co 的吸收随土壤中浓度升高而增加,向地上部分迁移的能力也较强,地上部分富集系数较高。

3 讨论

POD、SOD 和 CAT 的共同作用是能把体内具潜在危害的活性氧转化为无害的物质^[8],酶活性的提高

是相应于活性氧含量增加的应急解毒措施,是使细胞免受毒害的调节反应,酶活性下降后,对活性氧的消除能力减弱,从而使植物膜结构受到损伤^[3,15]。因此抗氧化防御系统酶活性的变化能说明植物对重金属胁迫的反应和重金属对植物造成的伤害程度。从长药景天的生理指标来看,SOD 和 CAT 含量在轻度污染时含量明显上升,而中度和重度污染时下降明显,POD 活性则随重金属污染程度的加重而逐渐降低,表明较高含量的重金属对长药景天的抗氧化防御系统产生了很不利的影响。抗氧化防御系统酶活性下降后,造成 $O_2^{\cdot-}$ 在体内积累和产生 $\cdot OH$ 及 MDA 的危险^[3]。MDA 是植物在胁迫环境下脂质过氧化的产物,本研究表明,在重度污染条件下 MDA 有较显著的积累,其含量升高表明植物受害程度增加。长药景天的可溶性糖含量在污染条件下基本没有变化,这与谢建治关于小白菜 (non-heading Chinese cabbage) 的还原糖变化趋势相近^[12]报道相似。还有一些报道表明重金属通过诱导络合蛋白合成,影响重金属在生物体内的扩散、累积及生物毒性,如 Zn 可诱导具有解毒功能的金属硫蛋白(MTs)的合成^[1],而秦天才等^[8]发现,在含 Cd 的培养液中加入 Pb,根系中可溶性蛋白质含量比单独加入时下降快得多(一方面对已有的蛋白质的分解加快,另一方面新蛋白的合成受阻),从而表现更大的破坏作用。长药景天的蛋白质含量在重金属混合污染环境中呈下降趋势,重度复合污染时下降显著。从现有的报道看,植物叶绿素含量在重金属胁迫环境中一般均减少^[10-12,16,20,21],但也有增加的报道,如姜虎生报道玉米 (*Zea mays* L.) 的叶绿素含量随 Hg, Cd 浓度增加而增加^[9],这与本研究中发现长药景天的叶绿素含量增加一致,看来植物的叶绿素含量对重金属的反应方式不同,也许与长药景天为肉质的景天科植物有关,或者原因可能在于本试验中重金属浓度不是非常高,其具体原因仍有待研究。

富集系数是衡量植物对重金属积累能力大小的一个重要指标^[9],富集系数越大,尤其是植物地上部富集系数越大,越利于植物提取土壤中重金属,因为地上部生物量比较容易收获。植物地上部富集系数大于 1,意味着植物地上部某种重金属含量大于所生长土壤中该种重金属的浓度,是超富集植物区别于普通植物对重金属积累的一个重要特征^[4,14]。本研究表明,长药景天对 Cr 和 Pb 的吸收主要集中在根部,向地上部分迁移很少,且富集系数较低,对 Cd 和 Hg、Co 的吸收富集系数较高,且向地上部分迁移的能力也较强。

其中,长药景天在轻度和重度复合污染条件下,其根、叶和果穗对 Co 的富集系数均大于 1,对 Hg 的富集能力也较强,在轻度污染条件下,除了茎的富集系数为 0.93 外,其他部分的富集系数均达到了 1,尤其是叶片的富集系数最高,而且本研究中未发现长药景天在重金属胁迫下外表形态的明显改变。因此,长药景天对 Hg、Co 轻度污染土壤的修复有一定的应用前景,有希望应用在 Hg 和 Co 污染土壤上作为绿化和美化环境的植物。

参考文献:

- [1] Chang C C, Huang P C. Semi-empirical simulation of Zn /Cd binding domains mammalian metallothionein [J]. *Protein engineering*, 1996. 9: 1165-1172.
- [2] 黄永杰,刘登义,王友保,等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J]. *生态学杂志*, 25(5):541-545.
HUANG Yong-jie, LIU Deng-yi, WANG You-bao, et al. Heavy metals accumulation by hydrophyte[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006. 25 (5):541-545.
- [3] 黄玉山,罗广华,关荣文. 镉诱导植物的自由基过氧化损伤 [J]. *植物学报(英文版)*, 1997, 39(6):522-526.
HUANG Yu Shan, LUO Guang-hua, GUAN Qi-wen. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by Cadmium to plant [J]. *Acta Botanica Sinica(English Edition)*, 1997, 39(6):522-526.
- [4] 郭水良,黄朝表,边媛,等. 金华市郊杂草对土壤重金属元素的吸收与富集作用:6 种重金属元素在杂草和土壤中的含量[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, 20(1):22-29.
GUO Shui-liang, HUANG Chao-biao, BIAN Yuan, et al. On absorption and accumulation of six heavy metal elements of weeds in Jinhua suburb- I Survey on content of six heavy metal elements in weeds and soil [J]. *Journal of Shanghai University (Agricultural Science)*, 2002. 20 (1):22-29.
- [5] 姜虎生,石德成. Hg、Cd 复合污染对玉米生理指标的影响[J]. *陕西农业科学*, 2005, (6):7-9, 105.
JIANG Hu-sheng, SHI De-cheng. The influence of Hg and Cd to the physiological indexes of corn[J]. *Shanxi Agricultural Science*, 2005, (6):7-9, 105.
- [6] 黎佳佳,胡红青,付庆灵,等. Cd Pb 单一与复合污染对辣椒生物量及重金属残留的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1):49-53.
LI Jia-jia, HU Hong-qing, FU Qing-ling, et al. Impact of single cadmium, lead and their combination pollution on pepper biomass and residues of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):49-53.
- [7] 刘家女,周启星,孙挺. Cd-Pb 复合污染条件下 3 种花卉植物的生长反应及超积累特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2006. 26 (12):2039-2044.
LIU Jia-nu, ZHOU Qi-xing, SUN Ting. Growing responses and hyper-accumulating characteristics of three ornamental plants to Cd-Pb combined pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006. 26 (12):2039-

2044.

[8] 秦天才,吴玉树,王焕校,等.镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J].生态学报,1998. 18:320-325.

QIN Tian-cai, WU Yu-shu, WANG Huan-xiao, et al. Effect of Cadmium, Lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of Brassica chinensis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18:320-325.

[9] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutase [J]. *Plant Physiol*,1993, 101:7-12.

[10] 孙 健, 铁柏清,钱 湛,等. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染对杂交水稻苗的联合生理毒性效应及临界值[J]. 土壤通报,2006, 37 (5): 981-985.

SUN Jian, TIE Bai-qing, QIAN Zhan, et al. The combined eco-toxicological effect of Cd,Pb,Cu,Zn and As pollution on a hybrid rice seedling and the critical value[J]. *Chinese Journal of Soil Science* , 2006, 37 (5): 981-985.

[11] 铁 梅,梁彦秋,张朝红,等. Cd 污染地草坪草中 Cd 分布特征及化学形态的研究[J]. 应用生态学报, 2002. 13(2):175-178.

TIE Mei, LIANG Yan-qiu, ZHANG Chao-hong, et al. Distribution characteristics and chemical pattern of cadmium in grasses planted in the cadmium contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2002, 13(2):175-178.

[12] 谢建治,李博文, 刘树庆. Cd、Zn 污染对小白菜营养品质的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2006, 26 (1):42-45.

XIE Jian-zhi, LI Bo-wen, LIU Shu-qing. Effects of cadmium and zinc pollution on the nutritional quality of non-heading Chinese cabbage[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2006, 26 (1):42-45.

[13] 王 新,梁仁禄,周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究 [J]农村生态环境, 2001, 17(2):41-44.

WANG Xin, LIANG Ren-lu, ZHOU Qi-xing. Ecological effect of Cd-Pb combined pollution on soil-rice system[J]. *Rural Eco-Environmen*, 2001, 17(2):41-44.

[14] 魏树和,周启星,王 新.超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J].环境科学, 2005, 26 (3):167-171.

WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-hyperaccumulator Solanum nigrum and its accumulating characteristics[J].*Environmental Science*, 2005, 26 (3):167-171.

[15] 徐勤松, 施国新,郝怀庆. Cd、Cr(VI)单一及复合污染对菹草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J]. 广西植物, 2001, 21(1):87-90.

XU Qin-song, SHI Guo-xin, HAO Huai-qing. Effects of Cd、Cr(VI) single and combine pollution on chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of Potamogeton crispus Linn[J]. *Guizhou*, 2001, 21(1):87-90.

[16] 徐勤松,施国新,周红卫,等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和性氧清除系统的影响[J].生态学杂志, 2003, 22(1):5-8.

XU Qin-song, SHI Guo-xin, ZHOU Hong-wei, et al.Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activate Oxygen in Leaves of Ottelia alismoides (L.) Pers[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):5-8.

[17] 杨铁钊,殷全玉,丁永乐,等. 烟草气孔特性、抗氧化酶活性与臭氧伤害的关系[J].植物生态学报, 2004, 28(5):672-679.

YANG Tie-zhao, YIN Quan-yu, DING Yong-le, et al. Relationships between ozone injury and stoma parameters and activities and antioxidant enzyme [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5):672-679.

[18] 张宪政. 植物生理学实验[M].沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989. 310-312.

ZHANG Xian-zheng. Experimental of plant experiments [M]. Shenyang: Science and Technology Press of Liaoning, 1989. 310-312.

[19] 张志良,翟伟菁. 植物生理学实验指导 [M].北京: 高等教育出版社, 2003. 268-270.

ZHANG Zhi-liang, ZHAI Wei-jing .Director of plant physiological experiment[M]. Beijing: Higher Education Press,2003. 268-270.

[20] 赵 殊,施晓东,常学秀. Cd、Zn 复合污染对小麦叶绿素含量的影响 [J].曲靖师范学院学报, 2004, 23(3):18-19.

ZHAO Shu, SHI Xiao-dong, CHANG Xue-xiu. Effects of Cd and Zn combined pollution on the content of wheat's chlorophyll [J]. *Journal of Qujing Teachers College* , 2004, 23(3):18-19.

[21] 魏海英,方炎明,尹增芳. Pb、Cd 单一及复合污染对弯叶灰藓某些生理特性的影响 [J].广西植物, 2003, 23(1):69-72.

WEI Hai-ying, FANG Yan-ming, YIN Zeng-fang. Effects of Pb,Cd single and joint pollution on some physiological characters of Hypnum revolutum [J]. *Guizhou*, 2003, 23(1):69-72.