

# 重金属污染土壤中菠菜对铅吸收和累积规律的研究

韩美清<sup>1</sup>, 王路光<sup>1</sup>, 郭平毅<sup>2\*</sup>, 张国印<sup>3</sup>, 武雪萍<sup>4</sup>

(1 河北省环境科学研究院, 河北石家庄 050051; 2 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801; 3 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050051; 4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 通过盆栽试验对苗期和收获期菠菜地上部和地下部的重金属含量进行测定, 并计算各元素的累积率和分配率, 以了解土壤 Pb 污染和重金属复合污染条件下菠菜 Pb 的吸收和积累规律。结果表明, Pb、Cd、Cu、Zn 复合污染条件下对 Pb 毒害起到抑制作用; 在 Pb、Cd、Cu、Zn 复合污染条件下, Cd、Cu、Zn 等金属离子的存在抑制了菠菜根系对 Pb 离子的吸收, 而对菠菜植株内 Pb 离子的运转影响不大。在本试验条件下, Pb 元素在地上部的分配率较低, 为 14.73%~28.72%。

**关键词:** 复合污染; 重金属; 生物有效性; 累积

中图分类号: X17; S636.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)04-0975-06

## Effect of heavy metal pollution on the absorption and accumulation of Pb in spinach

HAN Mei-qing<sup>1</sup>, WANG Lu-guang<sup>1</sup>, GUO Ping-yi<sup>2\*</sup>, ZHANG Guo-yin<sup>3</sup>, WU Xue-ping<sup>4</sup>

(1 Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

2 Agronomy College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

3 Agriculture Resources and Environment Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

4 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to study the absorption and accumulation of Pb in spinach grown in soil polluted by Pb or combined heavy metal, a pot experiment was carried out. The contents of heavy metals in the shoot and roots at the seedling and harvest stages, and the accumulation and distribution rates of each metal element were investigated. Results demonstrated that: combined heavy metal pollution by Pb, Cd, Cu, and Zn depressed the toxic effect of Pb. Under the condition of multiple heavy metal pollution, Cd, Cu, and Zn inhibited the absorption of Pb by the root system, but had slight effect on the transportation of Pb. Under the experimental condition, the distribution rate of Pb in the shoot was low being about 14.73% - 28.72%.

**Key words:** combined pollution; heavy metal; bioavailability; accumulation

我国面临的土壤环境安全问题日益突出, 受不同程度污染的土壤面积不断扩大, 土壤污染已成为农产品质量安全的严重隐患。目前, 我国受 Cd、As、Cr、Pb 等重金属污染的耕地面积近 2000 万公顷, 约占总耕地面积的 1/5, 其中约 1.3 万公顷耕地受 Cd

污染<sup>[1-2]</sup>。重金属污染对土壤生态系统存在显著影响, 表现为土壤肥力水平下降、土壤微生物群落结构发生演替、土壤酶活性受到抑制、植物品质降低等, 并最终通过食物链影响人体健康<sup>[3]</sup>。植物对重金属的吸收累积受土壤理化性质、重金属元素种类、污染

收稿日期: 2008-07-15 接受日期: 2009-01-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB109305); 河北省自然科学基金项目(C2006000757) 资助。

作者简介: 韩美清(1971—), 女, 山西原平人, 博士, 主要从事土壤污染与修复研究。E-mail: yuanmeihan@126.com

\* 通讯作者 Tel: 0354-6286938, E-mail: pyguo126@126.com

程度、环境因素等影响。同一植物对不同重金属元素的吸收富集能力不同,不同植物对同一种重金属的吸收富集能力也不同。许多研究表明,在低浓度和高浓度下,重金属间的交互作用对植物吸收的影响是不同的;同时重金属的交互作用在不同的植物类型的表现也不同,当多种元素存在时,其交互作用更为复杂<sup>[4]</sup>。目前,对土壤中重金属在复合污染条件下的形态分析及其对生物有效性影响的研究还处于初期阶段。本试验对 Pb、Cd、Cu、Zn 重金属复合污染条件下,Pb 与 Cd、Cu、Zn 元素交互作用进行了探索,以期为研究重金属复合污染条件下 Pb 的吸收和积累提供依据。

## 1 材料方法

### 1.1 试验设计

盆栽试验在河北省农林科学院试验基地的网室中进行。供试土壤为潮褐土,取自河北省农林科学院试验基地,其基本性状为 pH 7.66、有机质 12.60 g/kg、全 N 0.35 g/kg、碱解 N 51.06 mg/kg、速效 P 7.30 mg/kg、速效 K 129.45 mg/kg;重金属(mg/kg) Pb 30.54、Cd 0.14、Cu 21.52、Zn 13.81;CEC 13.10 cmol/kg。土壤经风干后,过 3 mm 筛。

试验时根据土壤重金属含量和试验设计添加重金属元素,共设 7 个处理(表 1),同时种植两组,每组 3 次重复,完全随机排列。所用塑料盆的内径 22 cm、深 18 cm,每盆栽土 4 kg。按设计量将  $Pb(AC)_2 \cdot 3H_2O$ 、 $Cd(AC)_2 \cdot 2H_2O$ 、 $CuSO_4$  和  $ZnSO_4$  配成溶液,与土壤反复混合均匀,同时并施入底肥(N 0.30、 $P_2O_5$  0.20、 $K_2O$  0.30 g/kg)分别以  $(NH_4)_2SO_4$ 、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2SO_4$

表 1 试验设计

Table 1 Design of the experiment

处理 Treatment	重金属用量(mg/kg) Heavy metal amount			
	Pb	Cd	Cu	Zn
T <sub>0</sub>	30.54	0.14	21.52	13.81
T <sub>1</sub>	150	0.15	50	100
T <sub>2</sub>	300	0.3	100	250
T <sub>3</sub>	500	1	400	500
T <sub>4</sub>	1000	2	800	1000
T <sub>5</sub>	500	0.14	21.52	13.81
T <sub>6</sub>	1000	0.14	21.52	13.81
土壤环境质量 Soil environ. qual. stand.(GB15618-95)				
二级 Grade II	≤300	≤0.3	≤100	≤250
三级 Grade III	≤500	≤1.0	≤400	≤500

施入,平衡一周播种。供试菠菜(*Spinacia oleracea*)品种为“日本全能”。于 2006 年 9 月 27 日播种,出苗 3 d 后(10 月 5 日)定株,每盆 10 株。

### 1.2 样品采集及测定方法

分别于苗期(出苗后 20 d)和收获时(生长 50 d)各采收一组。采收时均用水冲出盆内泥土,尽可能收集菠菜的全部地下部分。采收后测定菠菜叶绿素地上部、地下部的干重及其 Pb、Cd、Cu、Zn 含量。植物样品中 Pb、Cd、Cu、Zn 的含量用  $HNO_3-HClO_4$  消煮,原子吸收法测定,用国家环保总局标准样品校正。叶绿素含量的测定用丙酮和乙醇浸提法。

数据用 SAS 软件进行统计分析。

## 2 结果分析

### 2.1 不同生长期菠菜的叶绿素含量、地上部和地下部生物量

由表 2 可知,在重金属施入量较低时,苗期和收获期的叶绿素含量、地上部、地下部干重均有所增加。当用量超过 T<sub>2</sub> 水平,叶绿素和干物重迅速下降。除收获期的地下部干物重外,其他各处理间差异均达到显著水平,这与重金属引起植物矿质营养的缺乏<sup>[5]</sup>,或是中毒引起代谢功能紊乱,导致地下部生长发育受阻有关<sup>[6]</sup>。叶绿素的合成是在前质体或叶绿体中一系列酶的作用下形成的,重金属胁迫可能通过影响叶绿素合成相关酶类(如 Mg-螯合酶、叶绿素合成酶),进而影响叶片中的叶绿素的合成。Stobart 等<sup>[7]</sup>认为,叶绿素含量降低的原因是重金属抑制了原叶绿素酸酯还原酶(Protochlorophyllide reductase)和影响了氨基-γ-酮戊酸(Aminolaevulinic acid)的合成,而这两个酶对于叶绿素的合成是必需的,所以导致叶绿素含量的降低。也有可能是重金属离子(Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>)取代叶绿素结构中的 Mg<sup>2+</sup>而使叶绿素的结构改变,使叶绿素的合成受到影响或促使原有叶绿素加速分解,造成叶片中叶绿素含量降低。孙赛初等<sup>[8]</sup>认为,Pb 与叶绿体中蛋白质上的巯基(-SH)结合或取代其中的 Fe<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等,破坏了叶绿体的结构和功能活性,从而使叶绿素含量降低。

表 2 还看出,无论在苗期还是收获期,T<sub>5</sub> 处理的叶绿素含量地上、地下部干重均显著低于 T<sub>3</sub>,说明在 Pb 施入量较高时,单一 Pb 污染比 Pb、Cd、Cu、Zn 复合污染造成的毒害更严重,Pb、Cd、Cu、Zn 复合污染条件下对 Pb 毒害起到抑制作用。魏海英等<sup>[9]</sup>认为,Pb、Cd 复合污染的破坏作用明显大于相应的

表 2 不同生长期菠菜的叶绿素含量、地上部和地下部干重

Table 2 The content of chlorophyll, dry weight of shoots and roots of spinach at different growth stages

处理 Treatment	苗期 Seedling stage			收获期 Harvesting stage		
	叶绿素 Chlorophyll (g/kg)	地上部 Shoot (g/pot, DW)	地下部 Root (g/pot, DW)	叶绿素 Chlorophyll (g/kg)	地上部 Shoot (g/pot, DW)	地下部 Root (g/pot, DW)
T <sub>0</sub>	1.3 a	3.56 b	1.44 b	2.7 b	19.24 b	4.42 ab
T <sub>1</sub>	1.4 a	4.28 a	1.86 a	3.1 a	21.39 a	4.63 a
T <sub>2</sub>	1.4 a	4.04 a	1.69 ab	3.2 a	21.03 ab	4.59 a
T <sub>3</sub>	1.1 b	2.82 c	1.07 c	2.2 c	16.42 c	4.20 ab
T <sub>4</sub>	0.8 c	0.51 e	0.32 e	1.6 d	8.25 d	2.67 c
T <sub>5</sub>	0.9 c	1.67 d	0.61 d	1.7 d	12.89 cd	3.54 b
T <sub>6</sub>	0.6 d	0.44 e	0.28 e	1.3 e	6.55 d	1.77 d

注:表中数据为3次重复的平均值。同一列数值后不同字母表示差异达5%显著水平,下同。

Note: The data are mean values of 3 repeats. Values followed by different letters in same column means significant at 5% level. The same below.

单一污染,显示出协同效应的趋势。可见,Pb、Cd、Cu、Zn复合污染比Pb、Cd复合污染的交互作用更为复杂。

## 2.2 苗期和收获期菠菜地上部、地下部的Pb、Cd、Cu、Zn含量

重金属元素以可溶的离子态施入土壤后迅速转化为其他复杂的形态,在植物的吸收过程中也存在着复杂的交互作用。一方面是植物利用地下部分分泌的特殊有机物,如细胞内的金属硫蛋白、植物螯合肽或者某些有机酸、氨基酸等物质,促进土壤中重金属元素的溶解与地下部的吸收<sup>[10]</sup>;另一方面是利用一些特殊的蛋白,如金属硫蛋白(Metallothionein, MTs)、金属螯合肽即植物螯合肽(Phytochelatin, PCs)等,与重金属离子结合固定,将其吸收的重金属离子累积在根部,或将其大部分运输到地上部,从而减轻毒害<sup>[11-12]</sup>。表3看出,随重金属施入量的增加,苗期菠菜地上部、地下部重金属含量均逐渐增加,且地下部的含量远高于地上部。地下部各处理间的Pb、Cd、Cu、Zn含量的差异均达到显著水平,而地上部Cu、Pb含量在相邻处理间差异不显著。

地上部的Pb含量T<sub>5</sub>与T<sub>3</sub>、T<sub>6</sub>与T<sub>4</sub>处理差异均不显著;而地下部分Pb含量T<sub>5</sub>与T<sub>3</sub>、T<sub>6</sub>与T<sub>4</sub>均达到显著水平(表3)。说明在Pb、Cd、Cu、Zn复合污染条件下,Cd、Cu、Zn等金属离子的存在抑制了菠菜根系对Pb离子的吸收,而对菠菜植株内Pb离子的运转影响不大。

表3表明,收获期地上部和地下部重金属含量均随重金属施入量的增加而增高。各处理菠菜地上部Pb、Cu含量低于地下部含量,而Cd、Zn则相反。收获期菠菜地上部的重金属含量与苗期相比变化不大,而地下部含量均有所降低。重金属高量处理(T<sub>4</sub>)地上部Pb、Cd、Cu、Zn含量与地下部含量的比值分别为0.06、1.64、0.12、2.06,而且地下部Zn含量仅为苗期的50%,降幅最大。这可能是由于在Pb、Cd、Cu、Zn共同胁迫的情况下,可以刺激菠菜植株中合成或是激活一些新的活性物质,有助于将金属离子从细胞质运至液泡中,或者使金属离子沉积在地下部,从而对重金属的毒性起到缓解作用<sup>[13-16]</sup>。

T<sub>6</sub>处理地上、地下部Pb含量显著高于T<sub>4</sub>,Cd含量显著高于T<sub>0</sub>,Cu含量与T<sub>0</sub>相比差异不显著;Zn含量地上部T<sub>6</sub>显著低于T<sub>0</sub>,而地下部与T<sub>0</sub>无显著差异(表3)。说明在高Pb浓度条件下,有助于菠菜对Cd的吸收和运转,这与陈怀满<sup>[17]</sup>通过土壤吸附动力学试验认为Pb替代了土壤胶体吸附的Cd,有利于Cd进入土壤溶液的结果相符。Valle<sup>[18]</sup>认为,Pb可以阻止Cd与硝酸还原酶的巯基(-SH)结合,降低Cd对硝酸还原酶的毒害。Pb对Zn的影响主要表现为抑制了Zn元素向地上部分转移,这与许嘉琳、Braude G L、Kabata P A等人<sup>[19-21]</sup>的研究基本相符。可能是因为Pb逐渐在根组织中沉淀累积,破坏了根系吸收、运输功能,导致根系Zn的累积和地上部Zn吸收量降低。

表 3 苗期和收获期菠菜地上部、地下部 Pb、Cd、Cu、Zn 含量(mg/kg)

Table 3 The contents of Pb, Cd, Cu and Zn in shoots and roots at the seedling and harvesting stages

处理 Treatment	地上部 Shoot				地下部 Root			
	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn
苗期 Seedling stage								
T <sub>0</sub>	1.061 d	0.071 d	10.87 cd	26.51 e	12.735 f	0.375 e	10.39 e	34.77 e
T <sub>1</sub>	1.825 c	0.073 d	11.74 c	46.37 d	42.657 e	0.369 e	57.27 d	94.18 d
T <sub>2</sub>	3.644 bc	0.432 c	21.60 b	91.80 c	66.561 d	1.100 c	118.64 c	143.68 c
T <sub>3</sub>	3.926 b	0.890 b	28.77 ab	124.85 b	86.842 c	1.976 b	234.58 b	186.37 b
T <sub>4</sub>	4.371 a	1.264 a	31.46 a	231.21 a	119.594 b	2.965 a	318.59 a	227.61 a
T <sub>5</sub>	3.901 b	0.071 d	10.76 d	24.88 e	116.445 b	0.627 de	11.24 e	28.35 e
T <sub>6</sub>	4.369 a	0.067 d	10.93 cd	24.76 e	127.391 a	0.736 d	10.59 e	19.43 f
收获期 Harvesting stage								
T <sub>0</sub>	1.323 d	0.062 e	11.61 d	31.35 c	14.294 e	0.011 d	10.48 e	18.86 d
T <sub>1</sub>	1.915 d	0.057 e	13.62 c	52.64 c	33.513 d	0.017 d	55.63 d	40.57 c
T <sub>2</sub>	3.914 c	0.104 e	23.32 b	107.33 b	57.318 c	0.091 bc	120.44 c	88.04 b
T <sub>3</sub>	4.166 bc	0.932 b	30.72 ab	135.61 b	63.437 c	0.649 b	228.36 b	106.61 a
T <sub>4</sub>	4.625 b	1.369 a	36.21 a	233.17 a	82.701 b	0.837 a	297.17 a	113.04 a
T <sub>5</sub>	4.531 b	0.074 de	11.31 d	27.35 c	87.82 b	0.048 c	10.51 e	21.65 d
T <sub>6</sub>	5.043 a	0.093 d	11.28 d	24.21 d	105.71 a	0.059 c	10.69 e	20.19 d

### 2.3 收获期菠菜地上部、地下部的 Pb、Cd、Cu、Zn 的累积率

Cu、Zn、Pb 元素地上部和地下部的累积率都随土壤中重金属元素浓度的增高而降低(表 4)。在土壤中重金属元素浓度较低时,地上部和地下部中 Cd 的累积率逐渐增高,处理 T<sub>3</sub> 水平时达到最高,然后下降;与处理 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 相比达到差异显著水平。Pb、Cu 元素地上部的累积率低于地下部,Cd、Zn 元素地上部的累积率高于地下部。处理 T<sub>5</sub>、T<sub>6</sub> 地上、地下部 Pb 积累率与 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 相比差异不显著;与 T<sub>0</sub> 相比地上部 Cd 积累率有所增加,Zn 地下部分积累率有所增加,但均未到差异显著水平。说明在 Pb、Cd、Cu、Zn 共同胁迫的情况下,有助于 Cd、Zn 由地下部向地上部分转移,但不利于 Pb、Cu 元素向地上部分转移运输。

### 2.4 收获期菠菜地上部 Pb、Cd、Cu、Zn 的吸收量和分配率

表 5 看出,在土壤中重金属元素浓度较低时,菠菜地上部 Pb、Cd、Cu、Zn 的吸收量随土壤中浓度的增高而增加;在 T<sub>3</sub> 水平时达到最高,而 T<sub>4</sub> 水平的吸收量反而下降。这是因为 T<sub>4</sub> 水平时,植株生长受到抑制,生物量较低。重金属元素在上的分配率随土壤中浓度的增高总体呈现下降的趋势,Cu 元素在上的分配率随土壤中重金属元素浓度的增高降低最显著,分配率由 82.82% 降低到 27.35%;而 Pb 元素在上的分配率总体上较低,仅为 14.73%~28.72%。T<sub>5</sub>、T<sub>6</sub> 与 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 相比,地上部分 Pb 的分配率略有降低;与 T<sub>0</sub> 相比,地上部分 Cd、Cu、Zn 的分配率明显降低,说明在复合污染条件下减少了 Pb 向地上部分转移。

表 4 收获期菠菜地上部、地下部的 Pb、Cd、Cu、Zn 的累积率(%)

Table 4 The accumulation rates of Pb, Cd, Cu and Zn in shoots and roots at the harvesting stage

处理 Treatment	地上部 Shoot				地下部 Root			
	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn
T <sub>0</sub>	4.33 a	44.29 c	53.95 a	227.01 a	46.80 a	7.86 d	48.70 b	136.57 a
T <sub>1</sub>	1.28 b	38.00 c	27.24 b	52.64 b	22.34 b	11.33 c	111.26 a	40.57 b
T <sub>2</sub>	1.30 b	34.67 c	23.32 b	42.93 b	19.11 b	30.33 b	120.44 a	35.22 b
T <sub>3</sub>	0.83 c	93.20 a	17.68 c	27.12 c	12.69 c	64.90 a	57.09 b	21.32 c
T <sub>4</sub>	0.46 d	68.45 b	4.53 d	23.32 c	8.27 c	41.85 b	37.15 c	11.30 d
T <sub>5</sub>	0.91 c	52.86 bc	52.56 a	198.04 a	17.56 bc	34.29 b	48.84 b	156.77 a
T <sub>6</sub>	0.50 d	66.43 b	52.42 a	175.31 a	10.57 c	42.14 b	49.67 b	146.20 a

表 5 收获期菠菜地上部 Pb、Cd、Cu、Zn 的吸收量和分配率

Table 5 The absorption and distribution rate of Pb, Cd, Cu and Zn in shoots at the harvesting stage

处理 Treatment	吸收量 Absorption amount ( mg/pot )				分配率 Distribution rate ( % )			
	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn
T <sub>0</sub>	0.0255	0.0012	0.2234	0.6032	28.72	96.08	82.82	87.86
T <sub>1</sub>	0.0410	0.0012	0.2913	1.1260	20.89	93.94	53.08	85.70
T <sub>2</sub>	0.0823	0.0022	0.4904	2.2571	23.83	83.96	47.01	84.82
T <sub>3</sub>	0.0684	0.0153	0.5044	2.2267	20.43	84.88	34.47	83.26
T <sub>4</sub>	0.0382	0.0113	0.2987	1.9237	14.73	83.48	27.35	86.44
T <sub>5</sub>	0.0584	0.0010	0.1458	0.3525	15.82	84.88	79.67	82.14
T <sub>6</sub>	0.0330	0.0006	0.0739	0.1586	14.00	85.37	79.61	81.61

注 (Note): 地上部分配率 = 地上部吸收量/吸收总量 Distribution rate = absorption in leaf/total absorption.

### 3 结论

1) 在重金属施入量较低时, 苗期和收获期的叶绿素含量, 地上部、地下部干重均有所增加, 当用量超过 T<sub>2</sub> 水平, 叶绿素和干物重迅速下降。Pb、Cd、Cu、Zn 复合污染条件下, 对 Pb 的毒害起到了抑制作用。

2) 随重金属施入量的增加, 菠菜地上部、地下部重金属含量逐渐增加, 且苗期地下部的含量远高于地上部; 收获期地上部 Pb、Cu 含量低于地下部含量, 而 Cd、Zn 则相反。

3) 随土壤中重金属元素浓度的增高, 菠菜地上部和地下部 Cu、Zn、Pb 元素的累积率下降; 而在土壤中重金属元素浓度较低时, 地上部和地下部中 Cd 的累积率逐渐增高, Pb、Cd、Cu、Zn 共同胁迫的情况下, 有助于菠菜对 Cd 的吸收和运转。

4) 在 Pb、Cd、Cu、Zn 共同胁迫的情况下, 不利于 Pb 元素向地上部分转移运输。Pb 元素在地上部的分配率较低, 仅为 14.73%~28.72%。

### 参考文献:

- [1] 陈同斌. 土壤污染将成为中国的世纪难题[J]. 科技文萃, 2005, 3(9): 30-32.  
Chen T B. Soil pollution will become the problem of the century in China[J]. Digest of Science and Technology, 2005, 3(9): 30-32.
- [2] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物学效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 299-302.  
Liao Z J. The environment chemistry and biological effect[M]. Beijing: China Environ. Sci. Press, 1993. 299-302.
- [3] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 216-228.  
Chen H M. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005. 216-228.
- [4] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重山. 土壤重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤, 2000, 19(2): 96-98.

Shang A A, Liu Y R, Liang C S. Research progress in the bioavailability of soil heavy metals[J]. Soil, 2000, 19(2): 96-98.

- [5] 王慧忠, 何翠屏, 赵楠. 铅对草坪植物生物量与叶绿素水平的影响[J]. 草业科学, 2003, 20(6): 73-75.  
Wang H Z, He C P, Zhao N. The effect of Pb on the plant biomass and chlorophyll content[J]. Pratacul. Sci., 2003, 20(6): 73-75.
- [6] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉、铅及其相互作用对小白菜地下部生理生态效应的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 320-325.  
Qin T C, Wu Y S, Wang H X *et al.* The physiological and ecological effect of Cd and Pb on the cabbage roots[M]. J. Ecol., 1998, 8(3): 320-325.
- [7] Stobart A K, Griffiths W T, Ameen-Bukhari I *et al.* The effect of Cd on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley[J]. Plant Physiol., 1985, 63: 293-298.
- [8] 孙赛初, 王焕校, 李启任. 水生维管植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探[J]. 植物生理学报, 1985, 11(2): 113-121.  
Sun S C, Wang H X, Li Q R. The physiological changes of aquatic plants affected by pollutant Cd and its toxicity mechanism[J]. J. Plant Physiol., 1985, 11(2): 113-121.
- [9] 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 H Y, Fang Y M, Yi Z F. Effects of Pb, Cd single and joint pollution on some physiological characters of *Hypnum revolutum*[J]. Guangxi Plant, 2003, 23(1): 69-72.
- [10] Verkelij J A C, Schat H. Mechanism of metal tolerance in high plants: evolutionary aspects[M]. Boca Raton Florida: CRC Press Inc, 1990. 179-193.
- [11] Meagher R B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants[J]. Curr. Opin. Plant Biol., 2000, 3: 153-162.
- [12] Romkens P, Bouwman L, Japenga J *et al.* Potentials and drawbacks of chelate enhanced phytoremediation of soils[J]. Environ. Poll., 2002, 116: 109-121.
- [13] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537.  
Liu X M, Nie J H, Wnag Q R. The absorption and tolerance of Pb in six plant species[J]. J. Plant Ecol., 2002, 26(5): 533-537.
- [14] 夏汉平, 束文胜. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性

- 与吸收差异研究[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1121-1129.
- Xia H P, Shu W S. The difference of Vetiver and Bahia grasses in resistance and absorption of heavy metals in Zn and Pb mines[J]. J. Ecol. 2001, 21(7):1121-1129.
- [15] 陈英旭, 林琦, 陆芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4):467-472.
- Chen Y X, Lin Q, Lu F *et al.* The detoxification of Pb and Cd in plants by organic acid[J]. Acta Sci. Circumst., 2000, 20(4):467-472.
- [16] 刘登义, 谢建春, 杨世勇, 等. 铜尾矿对小麦生长发育和生理功能的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 11(1):126-128.
- Liu D Y, Xie J C, Yang S Y *et al.* The effect of Cu mine on the growth and development of wheat[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 11(1):126-128.
- [17] 陈怀满, 郑春荣. 交互作用对植物生长和元素循环的影响[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1):47-49.
- Chen H M, Zheng C Y. The effect of interaction on the plant growth and element cycle[J]. Adv. Soil Sci., 1994, 22(1):47-49.
- [18] Vallee B I. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead[J]. Ann. Rev. Biochem., 1972, 41:91-128.
- [19] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 等. 作物体内铅、镉、铜的化学形态研究[J]. 应用生态学报, 1991, 2(3):244-248.
- Xu J L, Bao Z P, Yang J G *et al.* The chemical status of Pb, Cd and Cu in plants[J]. J. Appl. Ecol., 1991, 2(3):244-248.
- [20] Braude G L. Cadmium and lead content of soybean products[J]. J. Food Sci., 1980, 45:1187.
- [21] Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants (2nd ed.) [M]. Florida: CRC Press Inc., 1992. 75-164.