

沈阳张士污灌区 4 种杂草不同阶段富集 Cd 的研究

文秋红, 史 锟, 于丽华

(大连交通大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要:通过在沈阳张士 Cd 污染区不同阶段(每月月底)采集 4 种生物量较大的杂草、土壤和水,研究杂草镉富集数量及其富集量最大的时期。在杂草 Cd 吸收量最大时期收获杂草,可从土壤中带走更多的 Cd。结果表明,4 种杂草根 Cd 富集数量最大值的顺序为, 稗草 (*Echinochtoa crusgalli*) (84.48 mg·kg⁻¹)>藜 (*Chenopodium*) (71.39 mg·kg⁻¹)>芦苇 (*Phragmites*) (29.77 mg·kg⁻¹)>蒲草(*Typha*) (7.56 mg·kg⁻¹);芦苇、藜和稗草所有测定时期 Cd 含量都是根>茎叶,蒲草在 8 月份和 9 月份测定 Cd 含量为茎叶>根。藜根和茎叶在 8 月份达到最大值;芦苇根 8 月份吸收 Cd 量最大,茎叶 5 月份 Cd 含量最大;蒲草根 7 月份吸收 Cd 量最大,茎叶 8 月 Cd 含量最大;稗草根和茎叶在 6 月份 Cd 含量最大。土壤 Cd 含量有随温度增加而增加的趋势,最大值为 29.44 mg·kg⁻¹;水的 Cd 含量均小于植物和土壤。杂草 Cd 含量变化与土壤和水 Cd 含量变化有一定的相关性。

关键词:Cd污染区; 杂草; 生长阶段; 富集

中图分类号:X173 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)05-0843-06

Enrichment of Cadmium at Different Growth Periods of 4 Weeds in Shenyang Zhangshi with Wastewater Irrigation

WEN Qiu-hong, SHI Kun, YU Li-hua

(Environmental Science and Engineering Department of Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

Abstract: Absorption and accumulation of Cd at different growth periods by 4 weeds growing in Cd -contaminated area at Zhangshi Irrigation in Shenyang were studied with sampling each month. It has been found that enrichment of Cd in the 4 weeds was in an order: *Echinochtoa crusgalli*> *Chenopodium* >*Phragmites*>*Typha*, and the highest Cd concentration (84.48 mg·kg⁻¹) was discovered in *Echinochtoa crusgalli* in June. The distribution of Cd concentrations were: root>shoot in *Echinochtoa crusgalli*, *Chenopodium* and *Phragmites*, but in *Typha*, Cd concentration was higher in shoot than that in root during August to September. Cd uptake and accumulation in *Chenopodium* root and shoot were enhanced in August. While in *Chenopodium* Cd in shoot was enhanced in May and in root was in August, but Cd concentration of *Typha* root in July reached the highest concentration. In order to eliminate more Cd from soil, and harvesting *Echinochtoa crusgalli*, *Chenopodium*, *Phragmites*, *Typha* in June, August, August and July respectively, is proposed, according to the results mentioned above. The Cd concentration in soil increased with temperature and the highest Cd concentration was found to be 29.44 mg·kg⁻¹. The Cd concentrations of water were lower than that of weeds and soil.

Keywords: Cd-contaminated area; weeds; growth period; enrichment

自从 20 世纪 50 年代中期日本由于土壤 Cd 污染引起的“骨痛病”发生以来,Cd 污染问题引起人们的普遍关注,对 Cd 的研究也日益增多。利用超富集

植物清除土壤重金属污染的思路, 发展为现今的植物修复, 已成为环境科学的热点和前沿领域。一般认为^[11,12,14,15]超富集植物应同时具备 3 个特征:(1)植物地上部(茎和叶)重金属含量,是普通植物在同一生长条件下的 100 倍,其临界含量分别是 Zn 10 000 mg·kg⁻¹,Cd 100 mg·kg⁻¹,Au 1 mg·kg⁻¹,Pb、Cu、Ni、Co 约为 1 000 mg·kg⁻¹;(2)植物地上部重金属含量大于根部

收稿日期:2005-01-20

基金项目:国家自然科学基金杰出人才基金资助(39425013)

作者简介:文秋红(1982—),女,硕士,从事环境科学和土壤生态学研究。E-mail:wenye2000246@163.net

重金属含量;(3)植物的生长没有出现明显的受害症状且富集系数较大。当然,理想的超富集植物还应具有生长期短,抗病虫能力强,地上部生物量大,能同时富集两种或两种以上重金属的特点。研究表明^[9,10,13],一般的超富集植物存在着生物量小、生长缓慢、不利于机械作业或大面积栽培困难等缺点。

因此,寻找更多更为理想的超富集植物是植物修复这一技术的基础和关键。遍布于农田周围的杂草,一直被认为是没有什么利用价值的植物类型,其实这类植物易于在逆境中生长,特别是水肥条件得到改善后,生长迅速,生物量增大,能够弥补现有超富集植物的各种不足。本研究以自然生长在污灌区的 4 种杂草为研究对象,对杂草不同生长阶段对重金属 Cd 的积累特性及根 Cd 含量和地上部 Cd 含量与同时期土壤和水 Cd 含量之间的联系进行了探讨,为污染土壤植物修复提供基础资料和物质基础。

1 材料与方法

1.1 材料采集

选择辽宁省沈阳市西郊的张士污灌区作为采样点。该地距沈阳市区 3 km,属于温带湿润大陆性气候,平均温度 5~9℃,土壤类型为草甸棕壤,农田种植的作物为玉米、高粱和大豆。

采集的杂草样品为藜 (*Chenopodium*)、芦苇 (*Phragmites*)、稗草 (*Echinochtoa crusgalli*) 和蒲草 (*Typha*)。试验期间在植物不同生长阶段进行了 6 次采样,分别为 5 月 30 日、6 月 29 日、7 月 30 日、8 月 29 日、9 月 30 日、10 月 31 日(以下依次简称为 5、6、7、8、9、10 月份)。同时采集植物生长处的土样和水样。

1.2 样品分析

野外采集的植物分为根部和地上部(茎、叶和籽粒)两部分。用自来水冲洗以去除粘附于植物样品上的泥土和污物,再用去离子水冲洗。沥去水分后,在烘干前先在 105℃杀青 30 min,之后在 80℃下于烘箱中烘至恒重。烘干后的植物样,分别称重。再将地上部(茎、叶和花序混合在一起)和根系都磨碎并分别充分混合均匀,备用。

采集的土壤样在烘干前先在 140℃杀青 30 min,之后在 120℃下于烘箱中烘至恒重。烘干后分别称重,磨碎并充分混合均匀,备用。

采集的植物样、土壤样和水样,分别取 1 g、1 g 和 10 mL 并采用 HNO₃-HClO₄ 法消解,原子吸收分光光度计测定其中的重金属含量。3 次重复。

土壤样的基本化学性状见表 1。

表 1 土壤基本化学性状

Table 1 Chemical properties of soil sampled from Zhangshi irrigation region of shenyang city

pH	全 Cd	有机质	全 N	有效 P	有效 K
(H ₂ O)	/mg·kg ⁻¹	/%	/%	/%	/%
4.1	5.1	1.8	0.11	6.0	108

2 结果与分析

2.1 土壤和水

不同时期土壤和水中 Cd 含量的变化趋势基本相反(图 1),两者之间有一定的相关性。土壤 Cd 含量 5 月份开始呈增加趋势,7 月份达到最大值,然后开始大幅减少,9 月份减小幅度变小。水 Cd 含量 5 月份开始呈下降趋势,8 月份达到最小值,然后开始急剧增加,9 月份达到最大值,然后开始稍有下降。这说明杂草不同生长阶段对土壤中 Cd 的吸收数量不同。在杂草生长旺盛时期,Cd 的活性强,而且 7—8 月温度比其他阶段高,土壤矿化程度加强,有利于杂草对 Cd 的吸收。因此,4 种杂草 Cd 含量基本是在生长旺盛时期达到最大值。水中 Cd 含量是在杂草生长最旺盛时期达到最小值,这是由于杂草富集水中的 Cd 最多的原因。

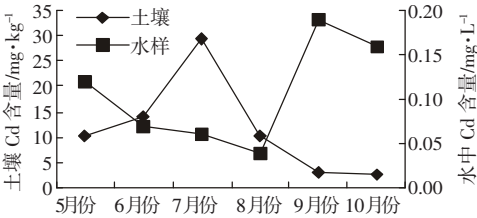


图 1 不同时期土壤和水中 Cd 含量变化图

Figure 1 Cd concentrations in soil and water at different growth period of weeds

2.2 不同生长阶段 4 种杂草的 Cd 含量变化

2.2.1 藜

藜 (*Chenopodium* L.) 是一年生直根系高大草本植物。从图 2 可以看出,每个生长阶段藜根 Cd 含量都高于茎叶 Cd 含量。这说明藜根的吸收 Cd 能力大于茎叶贮存 Cd 的能力。随着生长阶段的推移,无论是藜根还是茎叶,Cd 含量都先少许增加,8 月份达到最大值,然后开始减少。8 月份根和茎叶的 Cd 含量最大值分别是 71.39 和 9.55 mg·kg⁻¹。说明杂草生长旺盛阶段吸收 Cd 量最大。

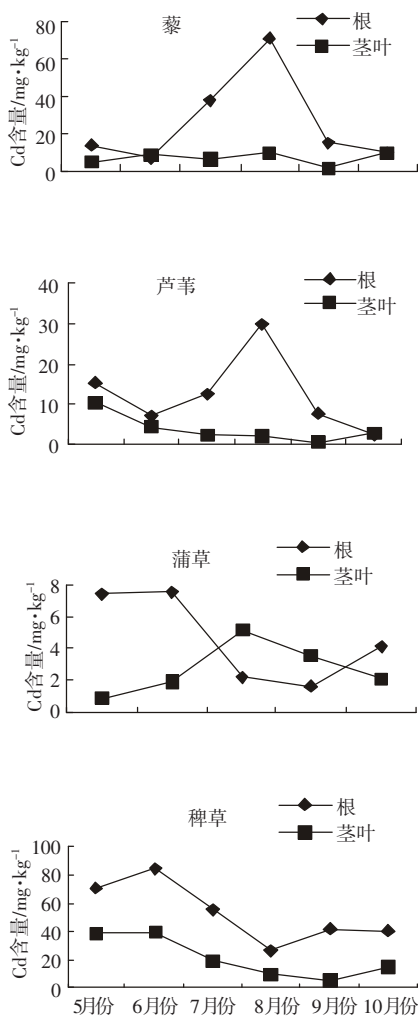


图2 不同生长阶段藜、芦苇、蒲草及稗草根和茎叶Cd含量变化图

Figure 2 Cd concentrations in shoot and root of *Chenopodium*, *Phragmites*, *Echinochloa crusgalli* and *Typha* at different growth periods

方差分析的结果表明,生长阶段对杂草根和茎叶中Cd含量有显著影响。各个生长阶段藜根和茎叶中Cd含量之间的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。

2.2.2 芦苇

芦苇(*Phragmites* L.)是多年生地下茎禾本科植物,是湿地环境中生长的主要植物之一。从图2可以看出,每个生长阶段芦苇根Cd含量都高于茎叶Cd含量。由于大部分Cd积累在芦苇根部,减轻了地上部分各器官的毒害作用,一定程度上提高了芦苇的耐Cd性^[2]。在芦苇的一个生长季中,芦苇根Cd含量先减少,6月份开始增加,8月底达到最大值($29.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)后呈减少趋势。芦苇茎叶Cd含量表现的趋势则有所不同。芦苇茎叶Cd含量5月份最高($10.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

kg⁻¹)。从生长初期开始Cd含量一直呈减少趋势,仅在9月和10月稍有增加。

从差异性分析来看,不同生长阶段芦苇根和茎叶Cd含量有较大差异。各个生长阶段芦苇根和茎叶中Cd含量之间的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。8月份根吸收Cd量最大,5月份茎叶Cd含量最大。这是因为生长初期茎叶生长量小,而生长旺盛时期根生长量较大。芦苇这种典型的湿地植物,7、8月份是其最佳生长时期,其各个组织、系统的生命活动达到最佳状态,各种酶活性最强。9、10月份,芦苇的一个生长季接近末期,各项生理机能衰退。Cd吸收和转移的数量也减少。

2.2.3 蒲草

蒲草(*Typha* L.)是多年生直根系高大草本植物,生于浅水或池沼中。从图2可以看出,不同生长阶段蒲草根和茎叶Cd含量变化比较明显,而且变化趋势差异很大。蒲草根Cd含量先稍增加,7月份开始减少,9月份达到最小值($1.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),然后呈增加趋势。但在生长后期根的Cd含量仍低于5月份的。蒲草茎叶Cd含量的变化趋势明显有很大的不同,从生长初期Cd含量一直呈增加趋势,在8月份达到最大值($5.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)后Cd含量开始减少。

在8月份到9月份这段时期蒲草茎叶Cd含量高于其根Cd含量。虽然蒲草茎叶、根Cd含量都比较低($<10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但蒲草的生物量比较大。进一步研究蒲草不同时期富集Cd的情况或许是我们寻找另外一种Cd超积累植物的突破口。

不同生长阶段蒲草根和茎叶Cd含量差异性比较明显,各个生长阶段蒲草根和茎叶中Cd含量之间的差异均达到显著水平($P<0.01$)。7月份根吸收Cd量最大,8月份茎叶Cd含量最大。因此,为了减少土壤的Cd含量,修复Cd污染土壤,应该在蒲草生长旺盛时期收获蒲草茎叶。

2.2.4 稗草

稗草(*Echinochloa crusgalli* L.)是一年生草本植物,属于稻田杂草。从图2可以看出,不同生长阶段稗草根和茎叶Cd含量变化趋势基本一致,且每个生长阶段根Cd含量都远远高于茎叶Cd含量。这说明稗草的根吸收量大于稗草从根到茎叶的运输量。但由于它在田间自然生长非常旺盛,在Cd含量最大时收获,焚烧后回收Cd,对于缓解土壤污染压力,修复Cd污染土壤也具有很好的效果。

稗草根和茎叶Cd含量都是前期稍有增加,6月

份开始减少,8 月份根 Cd 含量到达最小值($26.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而茎叶 Cd 含量在 6 月份达到最大值($39.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),9 月份达到最小值($4.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),达到最小值后都稍有增加,但增加幅度不大。稗草虽然 6 月份达到最大值,但此时稗草的生物量还未达到最大,不是收获稗草的最佳时期。

从差异性分析来看,不同生长阶段稗草根和茎叶 Cd 含量差异明显,各个生长阶段稗草根和茎叶中 Cd 含量之间的差异均达到极显著水平($P < 0.01$)。

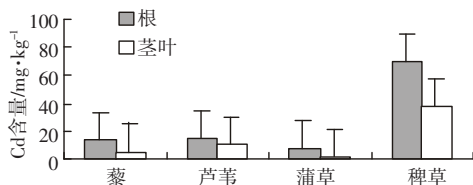


图 3 5 月份 4 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 3 Comparison of Cd concentrations in shoot and root (May) among the four weeds

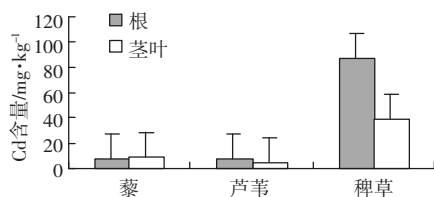


图 4 6 月份 3 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 4 Comparison of Cd concentrations in shoot and root (June) among the three weeds

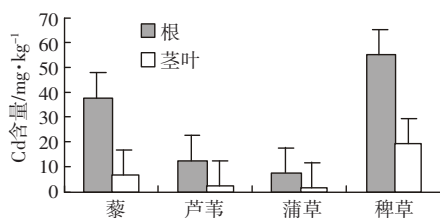


图 5 7 月份 4 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 5 Comparison of Cd concentrations in shoot and root (July) among the four weeds

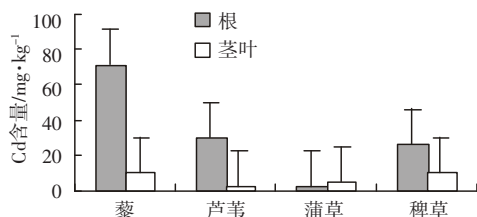


图 6 8 月份 4 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 6 Comparison of Cd concentrations in shoot and root (August) among the four weeds

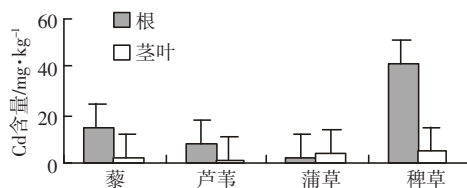


图 7 9 月份 4 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 7 Comparison of Cd concentrations in shoot and root (September) among the four weeds

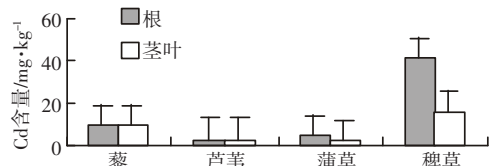


图 8 10 月份 4 种杂草间根和茎叶 Cd 含量比较图

Figure 8 Comparison of Cd concentrations in shoot and in root (December) among the four weeds

2.3 4 种杂草同期 Cd 含量

从图 3~8 可以看出,4 种杂草各阶段 Cd 含量大致是稗草>藜>芦苇>蒲草。

从图 3 可以看出,根和茎叶的 Cd 含量都是:稗草>>芦苇>藜>蒲草。说明前稗草吸收和运输 Cd 比较多。从图 4 可以看出,6 月份根 Cd 含量为:稗草>>芦苇≈藜。茎叶 Cd 含量则为:稗草>藜>芦苇。表现的趋势与 5 月份相同,但藜根 Cd 吸收量有所加快。从图 5 可以看出,根、茎叶含量都是:稗草>藜>芦苇>蒲草。藜根和茎叶 Cd 含量都超过芦苇,说明藜确有随温度增加吸收和积累 Cd 量增加趋势。从图 6 来看,根 Cd 含量为:藜>芦苇≈稗草>蒲草。藜和芦苇根的吸收 Cd 量速率继续加快,8 月份藜根的 Cd 含量已经达到研究的 4 种杂草最多。茎叶 Cd 含量为:稗草>藜>蒲草>芦苇。说明藜根吸收的多,而稗草茎叶积累的多。从图 7 可以看出,根 Cd 含量为:稗草>藜>芦苇>蒲草。茎叶 Cd 含量为:稗草>蒲草>藜>芦苇。与生长前期吸收和积累 Cd 的规律一致,但生长量有了很大的增加。这时是收获稗草和蒲草茎叶的最佳时期。从图 8 可以看出,根 Cd 含量为:稗草>>藜>蒲草>芦苇。茎叶 Cd 含量为:稗草>藜>芦苇>蒲草。这时是收获藜和芦苇茎叶的最佳时期。

2.4 杂草的耐性分析

表 2 列出 4 种杂草各个生长阶段根和茎叶的富集系数。若将参试杂草地上部对某种重金属的富集系数大于 1 的杂草称为高积累杂草,小于 1 的杂草称为

表 2 不同植物各个生长阶段的富集系数

Table 2 The Accumulation Coefficient of different plants at different growth period

项目	根	茎叶	项目	根	茎叶	项目	根	茎叶
5 月藜	1.32	0.50	7 月藜	2.68	0.47	9 月藜	4.91	0.53
5 月芦苇	1.48	1.01	7 月芦苇	0.91	0.18	9 月芦苇	2.58	0.27
5 月蒲草	0.73	0.09	7 月蒲草	0.54	0.14	9 月蒲草	0.54	1.14
5 月稗草	6.77	3.68	7 月稗草	3.94	1.35	9 月稗草	13.38	1.60
6 月藜	1.20	1.39	8 月藜	2.43	0.33	10 月藜	3.30	3.30
6 月芦苇	1.13	0.73	8 月芦苇	1.01	0.08	10 月芦苇	0.98	1.02
6 月稗草	13.66	6.17	8 月蒲草	0.07	0.18	10 月蒲草	1.46	0.73
			8 月稗草	0.90	0.34	10 月稗草	14.36	5.43

低积累杂草^[5,7]。从表 2 中可以看出试验中所研究的 4 种杂草都属于高积累杂草。最大富集系数为 14.36。

3 讨论

关于陆地杂草不同时期对土壤环境中重金属的吸收与富集作用的研究报道并不多见。刘金林(1985)研究了上海地区灰藜、车前和一年蓬 3 种陆生杂草对环境中 Pb、Cu、Cd、Zn 4 种重金属的吸收能力,指出陆生草本植物中, Cd 的含量是地上部分>地下部分^[3]。这与蒲草 8 月和 9 月研究结果一致,而与芦苇、藜和稗草研究结果不一致。黄朝表等^[1]研究了金华地区 11 种杂草对 4 种重金属的吸收和富集作用,表明北美车前、早熟禾、裸柱菊和蚊母草对 Cd 富集能力较强。叶海波等^[8]进行的研究表明,无性生殖的东南景天(*Sedum alfredii* H)比芥蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)更适合于修复 Cd 和 Zn 污染土壤。魏树和等^[5-7]进行的研究表明,马齿苋、蒲公英、龙葵、狼把草、小白酒花和欧亚旋覆花等 8 种植物具备了 Cd 超富集植物所应具有 的耐性强的的基本特征。

本研究结果表明:

- (1)4 种杂草富集 Cd 的能力为稗草>藜>芦苇>蒲草。
- (2)芦苇、藜和稗草所有生长阶段 Cd 含量都是根部>茎叶。因此,芦苇、藜和稗草都不属于超积累植物;蒲草在 8 月份和 9 月 Cd 含量茎叶>根部,都属于高积累植物;藜根和茎叶都在 8 月份达到最大值;芦苇 8 月份根吸收 Cd 量最高,5 月份茎叶吸收 Cd 量最高;蒲草 7 月份根吸收 Cd 量最高,8 月份茎叶吸收 Cd 量最高;稗草根和茎叶都在 6 月份吸收 Cd 量最高。
- (3)土壤中 Cd 含量在植物生长旺盛时期达到最高(29.38 mg·kg⁻¹)。而水中 Cd 含量则是在植物生长最旺盛时期达到最小值(0.04 mg·kg⁻¹),这是由于植物

富集了水中的 Cd。

杂草既不是栽培植物,也不是野生植物。具体地讲,除田园种植的“目的作物”之外,所有其他受到人为栽培条件的影响,但本身又不是栽培对象而在田间滋生带有野生特性的植物,都可以统称为杂草。我国野生植物资源丰富,生长在天然污染环境中的野生超积累植物不计其数,开发利用这些野生植物资源对植物修复技术意义重大。

在天然污染环境中必定存在累积重金属元素或者抗重金属的植物。通常,先到被目标重金属污染的地域去收集有希望的野生植物,尤其是矿区,然后回实验室进行筛选。大多数超积累的植物如庭荠属、蓝菜属等属野生型的植物都是通过此方法获得的。所获得的超积累植物虽累积能力高,但也存在致命的通病,即生长缓慢且生物量小,要到实用阶段还需做大量的工作。此外,可从已知的栽培品种和植物中筛选,油菜、向日葵、白杨等就是这样被发现的,这类植物往往生长快、生物量大、实际应用价值大。

对于野生类超积累植物,为使其实用化,目前可采用的方法有:通过改良育种手段培育新的植物品种,使其既有超积累特性,又能生长迅速,且生物量大。采用的育种改良方法可以是杂交、远缘杂交、突变等常规育种技术。这方面工作需要育种学家的参与。由于目前在克隆其基因上还存在着困难,所以改良生物技术还暂时无法应用^[2]。另外,或许能通过种植生物量大的耐积累植物,研究不同时期的 Cd 富集量,然后,在富集能力最强的生长阶段进行收获,可以达到将 Cd 从土壤中提取出来,修复 Cd 污染土壤的目的。

参考文献:

[1] 黄朝表,郭永良,陈旭敏,等.金华地区 11 种杂草对 4 种重金属的吸收与富集作用研究[J]. 农业环境保护, 2001,20(4):225-228.
[2] 江行玉,王长海,赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究[J]. 生态学报, 2003,23(5):856-862.

848	文秋红等:沈阳张士污灌区 4 种杂草不同阶段富集Cd 的研究	2005年 10 月
[3] 刘金林.高等维管植物对重金属的吸收与富集 [J].中国环境科学, 1985,5(2):24–28.	[10] Brooks R R, et al. Phytomining[J]. <i>Trends in Plant Science</i> ,1998,8:229.	
[4] 王校常,施卫明,曹志洪.重金属的植物修复--绿色清洁的污染治理技术[J].核农学报, 2000,14(5):315–320.	[11] Brown S L, et al.Zinc and cadmium uptake hyperaccumulator <i>Thlaspi caerulescens</i> grown in nutrient solution[J]. <i>Soil Sci Soc Am J</i> ,1995,59: 125.	
[5] 魏树和,周启星,王 新.18 种杂草对重金属的超积累特性研究[J].应用基础与工程学报,2003, 11(2): 152–160.	[12] Channy R L,et al. Phytoremediation of soil metals[J]. <i>Current Opinions in Biotechnology</i> , 1997,8:279.	
[6] 魏树和,周启星,王 新,等. 农田杂草的重金属超积累特性研究[J].中国环境科学,2004, 24(1):105–109.	[13] Ouyang Y. Phytoremediation :Modeling plant uptake and contaminant transport in the soil–plant–atmosphere continuum[J]. <i>Journal of Hydrology</i> ,2002,266:66.	
[7] 魏树和,周启星,王 新,等.杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J].自然科学进展, 2003,12(13):1259–1265.	[14] Salt D E. Phytoextraction: Present applications and future promise[A]. In: Wise D L, et al.ed.s. <i>Bioremediation of Contaminated Soils</i> [C].New York:Marcel Dekker,2000.	
[8] 叶海波,杨肖娥,何 冰,等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J].农业环境科学学报, 2003,22(5): 513–518.	[15] Salt E D,et al. Phytoextraction: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. <i>Biotechnology</i> , 1995, 13: 468.	
[9] 周启星,宋玉芳.植物修复的技术内涵及展望[J].安全与环境学报, 2001,1(3):48–53.		