

不同生境下锌镉在伴矿景天不同叶龄叶中的富集与分布特征^①

李思亮^{1,2}, 李娜², 徐礼生³, 谭维娜², 周守标¹, 吴龙华^{2*}, 骆永明²

(1 安徽师范大学生命科学学院重要生物资源保护与利用安徽省重点实验室, 安徽芜湖 241000; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3 安徽宿州学院化学与生命科学系, 安徽宿州 234000)

摘要: 田间试验、温室盆栽和生长室水培试验研究了 Zn 和 Cd 超富集植物伴矿景天不同叶龄叶片的 Zn、Cd 富集和分布特征。结果显示, 田间条件下伴矿景天新叶中 Cd 浓度高于成熟叶、但新叶中 Zn 浓度低于成熟叶。温室盆栽试验发现, 连续种植伴矿景天, 第 4 季时低污染土壤(S1)上新叶中 Zn 浓度低于成熟叶, 但高污染土壤(S4)上新叶中 Zn 浓度高于成熟叶; 而到了第 6 季, S1、S4 上新叶中 Zn 浓度均低于成熟叶, 且在 S1 上两者达到显著水平; 第 4 和第 6 季, 伴矿景天新叶中 Cd 浓度始终高于成熟叶(除 S1 成熟叶中 Cd 浓度略高于新叶外)。水培试验结果发现, 无论在高 Zn (600 μmol/L)、高 Cd (100 μmol/L), 还是低 Zn (10 μmol/L)、低 Cd (1 μmol/L) 处理, 新叶中 Zn、Cd 浓度均高于成熟叶; 而且随着处理时间的延长, 新叶和成熟叶中 Zn、Cd 浓度均明显上升。水培条件下, 新叶和成熟叶中 Zn 最高分别为 43 107、33 774 mg/kg (以干重计) (600 μmol/L, 处理 56 天); 新叶和成熟叶中 Cd 的最高浓度分别为 15 057、9 060 mg/kg (以干重计) (100 μmol/L Cd, 处理 56 天)。这些结果表明, Zn、Cd 在伴矿景天新叶和成熟叶中富集和分布与其生长介质中 Zn、Cd 的浓度尤其是有效态浓度、处理时间及植物所处的生长阶段等有关, 同时也表明 Zn、Cd 优先分布于新叶可能与伴矿景天超富集 Zn、Cd 的机制有关。

关键词: 伴矿景天; 叶龄; 锌; 镉

中图分类号: X53

锌(Zn)是工业化国家中最重要的污染物之一^[1], 广泛使用在油漆、橡胶和木材防腐等^[2]。而镉(Cd)是毒性最强的污染物之一, 土壤和水体中普遍存在 Cd 污染, 由于 Cd 能被植物(或作物)吸收并转移到地上部, 易通过食物链积累和放大作用毒性增加而引起人们的广泛关注^[3-4]。Cd 主要应用在电池、金属镀膜及塑料工业上^[5-6]。重金属污染土壤治理技术主要有土壤冲洗、玻璃化、电动力修复、焚烧、掩埋等, 这些技术治理费用较高^[7-8], 而植物修复技术因具有费用低廉、无二次污染、节约土地资源、环境友好和可持续发展等优点而被普遍接受^[9]。

伴矿景天是已被证实的在我国境内生长的 Zn 和 Cd 的超富集植物^[10]。杨肖娥等^[11]报道东南景天(*Sedum alfredii*)水培时叶中可以积累 17 360 mg/kg Zn 而不呈现任何中毒症状; Sun 等^[12]发现 *Bidens pilosa* 中 Cd 的浓度由大到小的顺序为叶>茎>根>花, Hammer等^[13]通过田间试验发现 *Salix viminalis* 叶

的生物量只占整株的15%~19%, 而其中的 Cd 提取量占整株的 34%~37%。所有这些都证实叶是 Zn 和 Cd 的重要储存器官, 而且这些元素在植物不同组织部位分布不均匀。

目前对不同植物不同叶龄叶片的重金属富集性研究较多, 但结果很不统一; 对造成叶中重金属的富集及分布差异原因的研究很少。本文以 Zn 和 Cd 的超富集植物伴矿景天为供试植物, 田间、盆栽和水培试验研究伴矿景天在不同生境下不同 Zn 或 Cd 处理水平下对不同叶龄叶中 Zn 或 Cd 的富集和分布特征, 以期为重金属污染土壤植物修复调控, 以及重金属在植物不同器官和组织中的富集分布特征及解毒或耐性机制的探明提供依据。

1 材料与方法

1.1 田间与盆栽试验

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G053)、国家高技术

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G053)、国家高技术研究发展计划项目(2006AA10Z406)、国家自然科学基金项目(40621001)和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)资助。

* 通讯作者(lhwu@issas.ac.cn)

作者简介: 李思亮(1982—), 男, 安徽怀远人, 硕士研究生, 主要从事污染生态学研究。E-mail: lisiliang1982@tom.com

事污染生态学研究

植物，田间和盆栽试验用的伴矿景天苗采自浙江杭州市郊的一个铅锌矿区，用自来水洗净，剪成大小一致枝条，在大培养盆中预培养。营养液配方如下：1 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、10 mmol/L $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、0.5 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 mmol/L KCl 、2 mmol/L MES 、1 mmol/L KOH 、10 $\mu\text{mol/L}$ H_3BO_3 、1.8 $\mu\text{mol/L}$ $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.31 $\mu\text{mol/L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 $\mu\text{mol/L}$ $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.5 $\mu\text{mol/L}$ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 mmol/L Fe-EDTA 、5 $\mu\text{mol/L}$ ZnNO_3 。用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调营养液 pH 值，使其保持在 5.8 左右，连续通气。预培养在生长室中进行，每日光照 14 h，日温 25℃，夜温 20℃，湿度 60% ~ 70%。营养液每 4 天更换一次，预培养两周后移栽至大田和盆栽。

田间试验于 2006 年 4 月至 7 月在浙江杭州郊区某污染农田土壤上种植伴矿景天，当地有小型金属冶炼厂，由于长期大气沉降和污水灌溉导致土壤重金属含量超标。土壤类型为湿润黏化富铁土，污染农田土壤 pH 值为 7.98，土壤中 Zn、Cd 含量分别为 1 374 mg/kg 和 3.60 mg/kg。

盆栽试验在南京土壤研究所温室中进行，供试土壤采自浙江杭州郊区冶炼小高炉附近，取 0 ~ 20 cm 表层土壤，风干、过 2 mm 尼龙筛，备用。分低污染（S1）和高污染（S4）两种，供试土壤基本性质见表 1。于 2006 年 4 月 15 日每盆种植伴矿景天 5 株，每处理 5 次重复，随机排列。每天浇去离子水，保持含水量为土壤最大田间持水量的 70%。定期追肥和松土，维持土壤的营养供给以及良好的结构。污染土壤用伴矿景天连续修复，共种植 6 季，其中盆栽第 4 季和第 6 季取样新老叶。第 4 季培养时间为 2007 年 4 月 14 日到 2007 年 7 月 5 日；第 6 季培养时间为 2007 年 11 月 15 日到 2008 年 4 月 15 日。

表 1 盆栽试验供试土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of soils used in pot experiment and total Zn and Cd concentrations

污染程度	pH (H ₂ O)	TC (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	CEC (cmol/kg)	总 Zn (mg/kg)	总 Cd (mg/kg)
S1	6.47	42.2	3.75	0.24	21.6	16.1	321	1.11
S4	7.24	29.1	2.21	0.22	22.9	11.9	6499	15.3

1.2 水培试验

将伴矿景天种子放在滤纸上发芽，然后转移到蛭石和珍珠岩混合基质上，浇全营养液，整个发芽过程在生长室中进行，营养液配方及生长室条件同田间与盆栽试验，4 周后转移到大培养盆中水培，预培养两周后开始处理，处理为 10 $\mu\text{mol/L}$ Zn（以 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）、600 $\mu\text{mol/L}$ Zn、1 $\mu\text{mol/L}$ Cd（以 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd。预培养和处理时用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调营养液 pH 值，使其保持在 5.8 左右，连续通气。营养液每 4 天更换一次。处理时转移到 2 L 塑料盆，每盆 5 株，每处理重复 3 次，随机排列，处理 7、28、56 天后分别取样。

所有植物样品收获后取最下边靠近根的 2 片叶为成熟叶（叶龄约为 90 天），顶端的 5 ~ 8 片未充分伸展的叶为新叶（叶龄小于 30 天）。新叶和成熟叶先用自来水冲洗 3 遍，再用去离子水冲洗 3 遍，105℃ 下杀青 30 min，然后在 85℃ 下烘至恒重，用研钵粉碎，

待用。

土壤样品采用王水-高氯酸消煮，植物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ （体积比 3:2）消煮，原子吸收分光光度计（Varian SpectrAA 220FS（火焰）、220Z（石墨炉））测定 Cd、Zn 浓度。

试验结果用 Excel 2003 和 SPSS11.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 田间条件下伴矿景天不同叶龄叶片锌镉积累特征

Zn、Cd 污染土壤上伴矿景天不同叶龄叶中 Zn、Cd 分布规律并不相同（表 2）。新叶中 Cd 的浓度是成熟叶中 3.1 倍，而成熟叶中 Zn 的浓度是新叶中的 1.5 倍。

表 2 田间污染土壤上伴矿景天不同叶龄叶中 Zn、Cd 浓度 (mg/kg)
Table 2 Zn and Cd concentrations in young and mature leaves

of *Sedum plumbizincicola* in polluted field

叶龄	Cd	Zn
新叶	69.9 ± 10.5	2 310 ± 327
成熟叶	22.3 ± 2.5	3 499 ± 572

2.2 盆栽条件下伴矿景天不同叶龄叶片锌镉积累特征

2.2.1 土壤全量 Zn、Cd 浓度 连续种植伴矿景天后，土壤中 Cd、Zn 全量下降，第 4 季种植前 S1 中 Zn 全量仅为原土的 81.9%，Cd 全量仅为原土的 52.2%；S4 中 Zn 全量减少为原土的 90.6%，Cd 全量减少为原土的 60.9%。第 6 季种植前 S1 中 Zn 全量仅为原土的 69.8%，Cd 全量仅为原土的 19.8%；S4 中 Zn 全量减少为原土的 84.5%，Cd 全量减少为原土的 34.8%（表 3）。

表 3 盆栽试验修复过程中土壤中 Zn、Cd 全量变化 (mg/kg)

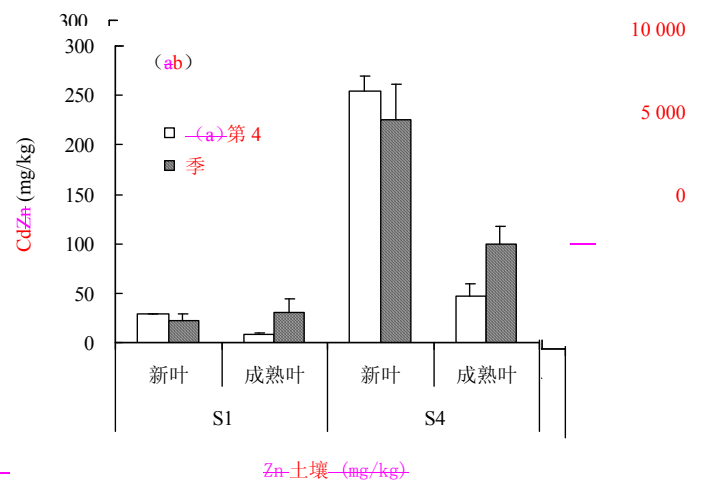
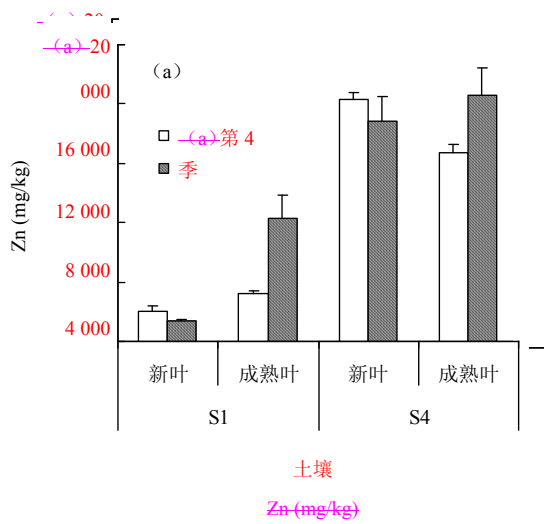
Table 3 Changes of total Zn and Cd concentrations in soils
during pot experiment

污染程度	采样时间	Zn	Cd
S1	第 4 季种植前	263 ± 13	0.58 ± 0.08
	第 6 季种植前	224 ± 11	0.22 ± 0.03
S4	第 4 季种植前	5 891 ± 478	9.32 ± 0.59
	第 6 季种植前	5 485 ± 445	5.33 ± 0.34

2.2.2 伴矿景天不同叶龄叶中 Zn、Cd 浓度 种植

第 4 季时，生长在 S1 上的伴矿景天成熟叶和新叶中 Zn 浓度分别为 3 242、2 048 mg/kg（图 1aA），差异不显著；而生长在 S4 上伴矿景天新叶和成熟叶中 Zn 浓度分别为 16 310、12 734 mg/kg，即新叶中 Zn 浓度显著高于成熟叶；收获第 6 季伴矿景天时发现，S1 和 S4 新叶和成熟叶中 Zn 的分布发生了变化：S1 上生长的伴矿景天成熟叶和新叶中浓度分别为 8 290、1 360 mg/kg，成熟叶 Zn 浓度显著高于新叶；S4 上成熟叶和新叶中浓度分别为：16 585、14 876 mg/kg，成熟叶中 Zn 浓度略高于新叶，但差异不显著。无论第 4 季还是第 6 季，生长在 S4 的伴矿景天新叶和成熟叶中 Zn 的浓度都显著高于 S1 上生长的同龄叶，表明随着土壤中 Zn、Cd 量的增加，伴矿景天叶中重金属的富集量也在增加。土壤中重金属总量的变化可能是引起第 4 季和第 6 季新叶和成熟叶 Zn 分布差异的原因。

除 S1 上第 6 季伴矿景天新叶和成熟叶 Cd 浓度差别不大外，第 4 季和第 6 季伴矿景天新叶中 Cd 均显著高于成熟叶（图 1bB）；Cd 最高浓度出现在 S4 上收获第 4 季，达 254 mg/kg。



伴矿景天新叶与成熟叶的这种 Zn 浓度变化特征,其原因可能是随着生长时间的延长,处理后期生物量增大的稀释效应所致,也或是新叶与成熟叶对 Zn 的吸收模式不同,新叶在处理前期吸收速率高并很快达到一个浓度平台,而成熟叶对 Zn 的吸收速率低、达到浓度平台需要的时间较长。随着处理时间的延长,600 $\mu\text{mol/L}$ Zn 处理下,新叶和成熟叶中 Zn 的浓度均不断增加,但在 7~28 天增长的速度较快(新叶和成熟叶处理 7 天后为 27 525、6 118 mg/kg,处理 28 天后分别增加到 41 280、18 833 mg/kg),28~56 天的新叶 Zn 浓度增长速度较慢而成熟叶增加较快(新叶和成熟叶处理 56 天后分别增加到 43 107、33 774 mg/kg),原因可能是处理 28 天后新叶中 Zn 浓度接近饱和(浓度平台),所以成熟叶中 Zn 含量增加相对较快,处理 56 天后新叶和成熟叶中 Zn 浓度最大可达 43 107、33 774 mg/kg;在 10 $\mu\text{mol/L}$ Zn 处理下,由于溶液中 Zn 的浓度较低(普通植物正常生长需要 Zn 的浓度为 5 $\mu\text{mol/L}$ Zn),伴矿景天新叶中 Zn 浓度先增加(7~28 天)后降低(28~56 天)。

2.3.2 不同 Cd 处理下伴矿景天不同叶龄叶中 Cd 的浓度 随溶液中 Cd 的浓度增加,伴矿景天新叶和成熟叶中 Cd 的浓度相应增加(表 4)。不论何种处理下,新叶中 Cd 浓度始终高于成熟叶。在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下,7 天后新叶中 Cd 浓度显著高于成熟叶,而处理 28 天和 56 天后,新叶中 Cd 浓度高于成熟叶,但差异不显著,其原因可能是溶液中 Cd 浓度较低,后期生物量增长的速度大于 Cd 浓度增长速度,即稀释效应所致。在 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下,7 天和 28 天后新叶中 Cd 浓度均显著高于成熟叶,处理 7 天后甚至达到极显著水平,处理 56 天后新叶中 Cd 浓度高于成熟叶,但未达到显著水平,原因可能是随着处理时间的延长新叶中 Cd 浓度即将达到饱和。新叶和成熟叶中 Cd 的浓度最大值均出现在 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理 56 天时,新叶和成熟叶中 Cd 的浓度分别为 15 057、9 060 mg/kg。

随着处理时间的延长,无论 1 $\mu\text{mol/L}$ 还是 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理,伴矿景天新叶和成熟叶中 Cd 的浓度均不断增加,在 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下,新叶和成熟叶均是前期(7~28 天)增长的速度较快,后期(28~56 天)的增长速度较慢;在 1 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理下,新叶和成熟叶中 Cd 浓度增长缓慢且均低于 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理,这种现象与 Zn 的积累特征相似。

3 讨论

3.1 不同生境下伴矿景天不同叶龄叶中镉浓度的差异

田间、盆栽和水培试验均发现,Zn 和 Cd 超富集植物伴矿景天新叶中 Cd 浓度高于成熟叶。Salt 等^[14]也发现了类似的结果,当遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)和印度芥菜(*Brassica juncea*)在 0.1 $\mu\text{g/ml}$ Cd 处理 24 h 后新叶比老叶中富集了更多的 Cd。Perronnet 等^[15]的研究也表明,生长在 Zn、Cd 复合污染土壤(Cd 为 16.3 mg/kg, Zn 为 1 280 mg/kg)上的遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)新叶中 Cd 浓度高于老叶。但有一些研究与上述结果不同,印度芥菜在 0.05、0.5、2.5、10 mmol/L Cd 处理 16 天后所有处理老叶中 Cd 浓度均高于新叶,且低浓度(0.05 mmol/L)处理下老叶高于新叶达到显著水平^[16]。土壤 Cd 浓度为 20、40 mg/kg 上生长的油菜和印度芥菜从地上部第一片叶到顶部叶中 Cd 浓度逐渐递减,老叶中 Cd 的浓度显著高于新叶,甚至油菜的第 2~5 片叶中含有的 Cd 超过整个地上部含量的 60%,所以油菜和芥菜在用于修复污染土壤时应该尽可能使其生长发育,但在老叶即将落下时应该及时收获,以防再次污染^[17]。我们的结果发现,连续种植伴矿景天后,根际土壤 NH_4OAc 提取态 Zn、Cd 浓度明显降低^[18]。产生上述差异的原因可能是植物生长介质中 Cd 尤其是有效态 Cd 浓度不同,也有可能是供试植物不同或者是试验时植物的生长阶段不同或是处理时间长短不同所致,有待深入研究。

3.2 不同生境下伴矿景天不同叶龄叶中锌浓度的差异

伴矿景天新叶和成熟叶中 Zn 浓度在田间、盆栽和水培试验中的规律不一致。大田试验中伴矿景天成熟叶 Zn 浓度高于新叶;在盆栽试验的低污染土壤上,第 4 和第 6 季结果和大田试验相同,而在高污染土壤上,第 4 季新叶中 Zn 含量显著高于成熟叶,第 6 季新叶和成熟叶中 Zn 含量没有差别。其原因可能是由于在大田试验和盆栽试验低污染土壤时,随着种植超富集植物季数的增加,土壤中重金属浓度降低,可被植物吸收的有效态 Zn 浓度降低,导致新叶中重金属浓度较成熟叶中低;而在高污染土壤上生长的伴矿景天,其土壤中重金属浓度高,连续种植景天后重金属含量变化相对较小,但有效态变化可能较大,从而导致在第 4 季时新叶和成熟叶中差异显著,而在第 6 季时则由于有效性下降更大而致两者差异不明显。这与龙新宪等^[19]的结果一致,通过对超富集生态型东南景天水培试验研究表明,在 1 $\mu\text{mol/L}$ Zn 处理 13 天后,上部叶(新叶)Zn 含量低于下部叶(成熟叶);但当溶液中 Zn 浓度增加到 500 $\mu\text{mol/L}$ 时,上部叶

Zn 浓度显著增大,而下部叶 Zn 浓度增加不明显,上部叶显著高于下部叶。

水培条件下,无论高 Zn 或低 Zn 处理,新叶中 Zn 浓度均高于成熟叶。这与对印度芥菜的研究结果一致^[16]。印度芥菜 (*Brassica juncea*) 在 2、10、50、100 mmol/L Zn 处理 15 天后收获 (100 mmol/L 处理 11 天),所有处理新叶中 Zn 浓度均略高于老叶,但没达到显著水平^[16]。原因可能是在上述水培条件下,溶液中重金属有效性极高,可全部被植物吸收,且满足植物的需求,而在 Zn 供应充足的条件下超富集植物可能优先供应 Zn 给幼嫩部位,有待进一步证明。

3.3 3.3-水培条件下伴矿景天新叶和成熟叶中锌和镉的时间

随着伴矿景天在 600 $\mu\text{mol/L}$ Zn 和 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 溶液中处理时间的延长,新叶和成熟叶中 Zn 和 Cd 浓度升高,处理 7~28 天增加较快,处理 28~56 天增加较慢 (Zn 处理成熟叶却增加较快)。原因可能是 Zn 处理 28 天后新叶中 Zn 含量接近饱和,所以成熟叶中 Zn 含量增加较快,以至于最后两者间没有差别 (56 天后)。这一结果与龙新宪等^[20]的研究类似,在 10 $\mu\text{mol/L}$ Zn 处理下,由于溶液中 Zn 的浓度较低 (普通植物正常生长需要 Zn 的浓度为 5 $\mu\text{mol/L}$),伴矿景天新叶中 Zn 浓度先增加 (7~28 天) 后降低 (28~56 天),原因可能是前期生物量增长速度较慢而后期较快所致;成熟叶中 Zn 浓度随着处理时间的延长几乎没有变化,可能是新叶中 Zn 浓度很低,远没有达到临界值, Zn 优先供应新叶所致。在 1 $\mu\text{-mol/L}$ Cd 处理下,新叶和成熟叶中 Cd 的增长速度缓慢,原因可能是新叶和成熟叶中 Cd 含量远远低于临界值,溶液中 Cd 浓度又相对较低所致。

4 小结

田间试验条件下伴矿景天新叶中 Cd 浓度高于成熟叶,而 Zn 则是成熟叶浓度更高⁺。

温室盆栽条件下,修复到第 4 季时,低污染程度土壤上 Zn 以成熟叶>新叶;高污染程度土壤上为成熟叶<新叶;修复到第 6 季时,低污染和高污染土壤上均为成熟叶>新叶。Cd 浓度则是除低污染土壤上成熟叶中 Cd 浓度略高于新叶外,其余处理均为新叶>成熟叶。

水培试验下,在处理 56 天内,任何处理下 Zn、Cd 浓度均是新叶>成熟叶;新叶和成熟叶中重金属浓度随处理浓度的增大而升高;随处理时间的延长,新

叶和成熟叶中 Zn、Cd 浓度均增大。

参考文献:

- [1] Nriagu JO, Pacyna JM. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 1988, 333: 134-139
- [2] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Zinc Available from U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA. CAS: Public Health Service, 2005: 2
- [3] Florijin PJ, Van Beusichem ML. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant Soil*, 1993, 150: 25-32
- [4] Li YM, Channey LR, Schneiter AA. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions. *Crop Sci.*, 1995, 35: 137-141
- [5] Adriano DC. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. New York: Springer-Verlag, 2001: 867
- [6] Cordero B, Lodeiro P, Herrero R, Esteban Sastre de Vicente M. Biosorption of cadmium by *Fucus spiralis*. *Environmental Chemistry*, 2004, 1: 180-187
- [7] Mulligan CN, Yong RN, Gibbs VF. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: An evaluation. *Engineering Geologist*, 2001, 60: 193-207
- [8] Pulford ID, Watson C. Phytoremediation of heavy metal contaminated land by trees-A review. *Environment International*, 2003, 29: 529-540
- [9] Yang XE, Feng Y, He ZL, Stoffella PJ. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *J. Trace Elements in Med. Biol.*, 2005, 18(4): 339-353
- [10] 吴龙华, 周守标, 毕德, 郭新弧, 秦卫华, 王辉, 王春景, 骆永明. 中国景天科植物—新种—伴矿景天. *土壤*, 2006, 38(5): 632-633
- [11] Yang XE, Li TQ, Yang JC, He ZL, Lu LL, Meng FH. Zinc compartmentation in root, transport into xylem, and absorption into leaf cells in the hyperaccumulating species of *Sedum alfredii* Hance. *Planta*, 2006, 224: 185-195
- [12] Sun YB, Zhou QX, Wang L, Liu WT. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 808-814
- [13] Hammer D, Kayser A, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Salix viminalis* in field trials. *Soil Use Manage.*, 2003, 19: 187-192

- [14] Salt DE, Prince RC, Pickering IJ, Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard. *Plant Physiology*, 1995, 109: 1 427–1 433
- [15] Perronnet K, Schwartz C, Morel JL. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multi-contaminated soil. *Plant Soil*, 2003, 249: 19–25
- [16] Sridhar BBM, Diehl SV, Han FX, Monts DL, Su Y. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54: 131–141
- [17] Wang JQ, Su DC. Distribution of cadmium in oilseed rape and Indian mustard grown on cadmium contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(4): 572–575
- [18] 李娜. 重金属污染土壤的伴矿景天吸取修复及其农艺调控研究 (硕士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008
- [19] 龙新宪, 麦少芝, 林初夏. 锌在两种生态型东南景天体内的分布和对亚显微结构的影响. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(5): 536–541
- [20] 龙新宪, 倪吾钟, 叶正钱, 杨肖娥. 超积累生态型东南景天吸收锌的特性. *生态学报*, 2006, 26(2): 334–340

Characters of Zn and Cd Accumulation and Distribution in Leaves of *Sedum plumbizincicola* at Different Ages

LI Si-liang^{1,2}, LI Na², XU Li-sheng³, TAN Wei-na², ZHOU Shou-biao¹, WU Long-hua², LUO Yong-ming²

(1 Key Laboratory of Biological Resources Conservation and Utilization of Anhui Province, College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Department of Chemistry and Life Science, Suzhou College in Anhui Province, Suzhou, Anhui 234000, China)

Abstract: Field plot experiment, pot trial and hydroponics culture were conducted to study the accumulation and distribution characters of Zn and Cd in the leaves of *Sedum plumbizincicola* at different ages. The results showed that young leaves had higher Cd concentrations than mature one

when grew at field plot, but the situation was opposite for Zn. Glass house pot experiment results showed that for fourth extraction season, Zn concentrations appeared to be higher in mature leaves than young ones when *Sedum plumbizincicola* grew at low Zn and Cd contaminations soil (S1), Zn concentrations in young leaves were higher than in mature one when plants grew at high Zn and Cd contamination soil (S4). For the sixth extraction season, Zn concentrations in mature leaves were significantly higher than in young ones at both S1 and S4. For both seasons, Cd concentrations in young leaves were significantly higher than in mature ones, except for the sixth extraction season of S1. Under hydroponics culture condition, Zn and Cd concentrations in young leaves were all higher than in mature ones. Cd and Zn concentrations in both mature and young leaves increased with incubation time, peaked at day 56 d, in mature and young leaves the highest concentrations of Zn were 43 107 and 33 774 mg/kg (DW) (600 μ -mol/L Zn) while and the highest concentrations of Cd were 15 057 and 9 060 mg/kg (DW), respectively. These results showed that accumulation and distribution characters of Zn and Cd in young and mature leaves were related to Zn or Cd concentrations in growth medium, especially to soil available Zn or Cd concentrations, treated time of heavy metals, plant growth stage. *Sedum plumbizincicola* has preferential allocation habit of Zn and Cd into shoots, especially into young leaves.

Key words: *Sedum plumbizincicola*, Leaf age, Zinc, Cadmium