锌镉交互作用对伴矿景天锌镉吸收性的影响①

刘芸君[1,2]，钟道旭[2]，李 柱[2]，李思亮[2]，郭凤根[1]，吴龙华[2*]

(1 云南农业大学农学与生物技术学院，昆明 650201；
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)

摘 要：采用水培试验、不同 Zn、Cd 污染程度农田土壤结合外加 Zn、Cd 基础上的土培盆栽法，研究了不同 Zn、Cd 浓度交互作用对伴矿景天生长及 Zn、Cd 吸收和分布的影响。水培试验结果表明，增加溶液中 Zn 和 Cd 浓度，伴矿景天各组织中 Zn 和 Cd 浓度显著增加，但两个高浓度处理间没有显著差异；Zn 在伴矿景天体内呈不均匀分布且与水培溶液中 Zn 和 Cd 浓度有关，当溶液中 Zn 浓度>Cd 浓度时，表现为新叶>成熟叶>其他部位>>根，反之则为成熟叶>其他部位>新叶>>根；而 Cd 在伴矿景天不同部位的分布没有一致的规律性；Zn、Cd 交互作用主要体现在伴矿景天新叶上：在溶液中外加 Cd 时，Zn 对伴矿景天新叶中 Cd 浓度具有“低促高抑”效应，而 Cd 处理对新叶中 Zn 浓度具有拮抗效应。土培试验也表明，添加 Zn 显著促进伴矿景天对土壤中 Cd 的吸收，外加 Cd 对伴矿景天 Zn 吸收具有拮抗效应；但无论 Zn 或 Cd，外加量过大均会显著抑制伴矿景天的生长，降低修复效率。

关键词：伴矿景天；Zn；Cd；交互作用；吸收；分布

中图分类号：X53

微量元素间存在相互制约的现象，影响着生物的吸收利用，几十年前人们已知 Zn 是 Cd 的竞争离子[1]。在众多微量元素中，由于 Zn 与 Cd 具有相同的核外电子构型，化学性质极为相似，且往往相伴生，存在着复杂的交互作用[2]。关于 Zn、Cd 交互作用的植物效应已有诸多深入研究，Zn、Cd 交互作用既有协同性，也有拮抗的一面，因土壤性质、Zn 的背景值、植物品种以及环境条件不同而异。Li 等[3]研究发现水培条件下东南景天存在强烈的 Zn、Cd 协同作用，添加 Zn 利于超积累型东南景天对 Cd 的吸收。由于 Zn、Cd 在环境中通常是同时存在而且两者化学性质相近，所以在植物吸收转运时这两种元素存在交互作用。

不同叶龄叶片的重金属吸收性不同，但多数关于植物不同叶龄叶片重金属富集性的研究只考虑一种或两种元素中的一种，没有考虑两元素间的交互作用[4-5]。Cd 污染土壤上通常都存在 Zn 等元素的复合污染[6]，有关 Zn、Cd 交互作用对这两种元素在超积累植物不同叶龄叶中的浓度和分布的影响的研究很少。伴矿景天是本课题组发现和报道的 Zn、Cd 超积累植物，且新叶中 Zn、Cd 常高于成熟叶[5]，但是 Zn、Cd 交互作用对植物生长及 Zn、Cd 吸取修复效率的影响则未见报道。因此，本文拟以 Zn、Cd 超积累植物——伴矿景天为供试植物，利用水培及土培盆栽试验研究 Zn、Cd 交互作用对伴矿景天不同组织部位的 Zn、Cd 分布及修复效率的影响，以期为 Zn、Cd 污染土壤的高效修复技术提供支持，并为伴矿景天超积累 Zn、Cd 机制的探明提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

水培和土培盆栽试验用 Zn、Cd 超积累植物伴矿景天苗采自浙江杭州市郊一铅锌矿区，用自来水洗净，剪成大小一致枝条，在大培养盆中预培养。用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调节 Hoagland 营养液至 pH 5.8 左右，并添加 MES 缓冲液控制 pH。幼苗预培养在植物生长室中进行，连续通气，每 4 天更换营养液一次。预培养两周后开始处理。

土培盆栽试验用土壤采自浙江杭州郊区某镀锌厂附近污染农田，该土壤 Zn、Cd 严重超标。土壤类型为水耕人为土，因长期施用石灰，呈中性或弱碱性，pH 为 7.3 ~ 8.0。取 0 ~ 20 cm 表层土壤，风干、过 2 mm 尼龙筛，备用。

①基金项目：国家自然科学基金项目(40930739)和科技部国际科技合作项目(2010DFA92360)资助。
* 通讯作者(lhwu@issas.ac.cn)
作者简介：刘芸君(1988—)，女，云南楚雄人，硕士研究生，主要从事植物学研究。E-mail: yjliu@issas.ac.cn

1.2　试验设计与实施

1.2.1 水培盆栽试验　　Zn、Cd 分别设置 3 个浓度，共 9 个处理，分别为 Cd0(Zn10，Zn300，Zn600)、Cd25(Zn10，Zn300，Zn600)和 Cd50(Zn10，Zn300，Zn600)，其中 Cd0Zn10 处理为对照，Zn、Cd 浓度单位μmol/L。处理时将预培养后的幼苗转移到 2 L 塑料盆，每盆 5 株，每处理重复 3 次，随机排列，处理一周后取样。期间同样用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调营养液 pH，使其保持在 5.8 左右，连续通气，每 4 天更换一次营养液。试验于 2009 年 2 月在中国科学院南京土壤研究所植物生长室进行，每日光照 14 h，日温 25℃，夜温 20℃，湿度 60% ~ 70%。

1.2.2 土培盆栽试验　　土培盆栽试验共采集不同污染程度的土壤 4 个，设其中相对污染程度最低的土壤为对照 CK，另外 3 个土壤依污染程度由低到高依次为 S1、S2、S3。取 S1 土壤，分别外加 Zn 1 000 和 2 000 mg/kg；取 S2 土壤，分别外加 Cd 16、32 mg/kg；由此形成 Zn、Cd 污染程度和比值不同的 9 个土壤，供试土壤 Zn、Cd 浓度及外加量、处理代号等详见表 1。外源重金属以分析纯 $ZnCl_2$ 和 $CdCl_2$ 的形式加入，在外源重金属加入 2 周后采集各处理的土壤样品，备测其全量 Zn、Cd 之用。试验每盆装土 2 kg(烘干基)，每盆移栽伴矿景天幼苗 6 株，每处理 4 次重复，随机排列。试验期间每天浇去离子水，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。试验于 2010 年 10 月至 2011 年 3 月在南京土壤研究所温室进行。

1.2.3 试验收获与样品前处理　　水培盆栽试验收获时伴矿景天根在 20 mmol/L Na_2-EDTA 浸泡 15 min，去除根表面残留的 Zn^{2+} 和 Cd^{2+}。整株先用自来水冲洗 3 遍，再用去离子水冲洗 3 遍，用吸水纸吸干，然后分为 4 个部分：新叶、成熟叶、根、其他部分；其中最下边靠近根的 2 片叶为成熟叶，顶端的 5 ~ 8 片未充分伸展的叶为新叶。称量各部分鲜重，105℃下杀青 30 min，然后在 85℃下烘干至恒重，称重后用不锈钢植物粉碎机磨碎，待测。

表 1　供试土壤全量 **Zn、Cd** 及外加 **Zn、Cd** 处理情况
Table 1　Total and spiked zinc and cadmium concentrations of tested soils

土壤田间号	处理代号	土中本底值(mg/kg)		外加量 (mg/kg)		总浓度 (mg/kg)		
		Zn	Cd	Zn	Cd	Zn	Cd	Zn/Cd
X16	CK	101	0.52	0	0	101	0.52	194
	S1	1 067	8.73	0	0	1 067	8.73	122
X11	S1-Zn1	1 067	8.73	1 000	0	2 067	8.73	236
	S1-Zn2	1 067	8.73	2 000	0	3 067	8.73	351
	S2	3 906	10.6	0	0	3 906	10.6	368
15	S2-Cd1	3 906	10.6	0	16	3 906	26.6	149
	S2-Cd2	3 906	10.6	0	32	3 906	42.6	91.6
16	S3	4 444	59.6	0	0	4 444	59.6	65.5

将土培盆栽试验的伴矿景天地上部带回实验室，用自来水洗涤，再用去离子水冲洗干净, 105℃杀青 30 min，85℃烘至恒重，称重，磨碎，备用。

植物样品采用 HNO_3-$HClO_4$ (v/v = 3/2)消煮，原子吸收分光光度计(Varian SpectrAA 220FS(火焰)、220Z(石磨炉))测定 Cd、Zn 浓度。测定所用 HNO_3 和 $HClO_4$ 均为优级纯，并采用国家标准参比物质(植物：GBW07602)进行分析质量控制，分析误差均在允许范围内。

1.3　数据分析与处理

试验结果用 Excel 2003 和 SPSS 11.0 统计软件进行分析及作图。

2　结果与分析

2.1　水培试验下 **Zn、Cd** 交互作用对伴矿景天不同部位 **Zn、Cd** 吸收性的影响

2.1.1　不同处理伴矿景天不同部 Zn 分布和浓度

Zn 在伴矿景天体内呈不均匀分布且与水培溶液中 Zn 和 Cd 浓度有关(图 1、表 2)。当溶液中 Zn>Cd 时，伴矿景天各部位 Zn 浓度为新叶>成熟叶>其他部位>>根；当溶液中 Zn<Cd (Cd25Zn10 和 Cd50Zn10 处理)时，伴矿景天各部位 Zn 浓度为成熟叶>其他部位>新叶>>根。

在任意 Cd 处理下，Zn300 和 Zn600 处理伴矿景

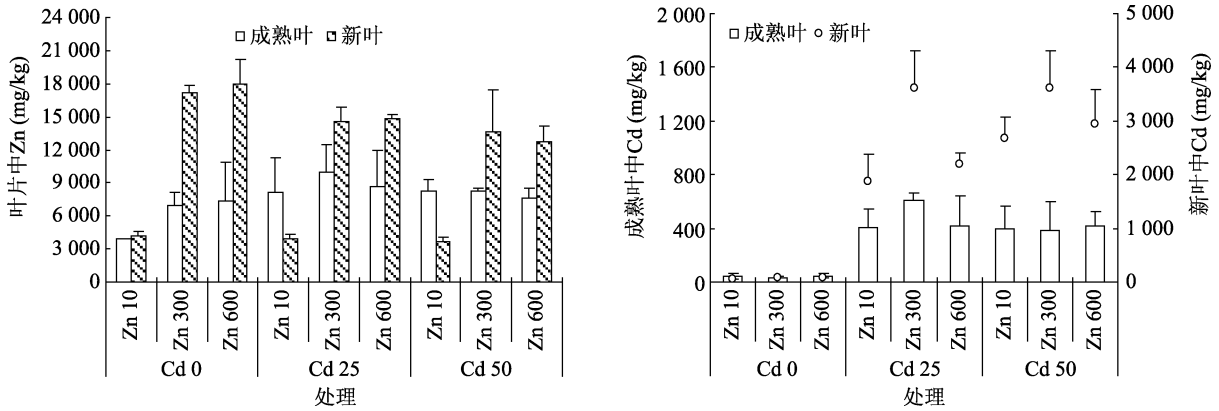


图 1　各处理下伴矿景天新叶与成熟叶中 Zn、Cd 浓度变化

Fig. 1　Zn and Cd concentrations in young and mature leaves of *S. plumbizincicola* in hydroponics culture

表 2　各处理下伴矿景天不同部位 Zn、Cd 浓度

Table 2　Zn and Cd concentrations in different parts of *S. plumbizincicola* in hydroponics culture

处理	Cd (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
	根	其他部位	根	其他部位
Cd0Zn10	3.23 ± 0.73 c	26.5 ±8.3 b	1 332 ±184 e	4 975 ± 670 d
Cd0Zn300	1.70 ± 0.55 c	39.1 ± 3.7 b	2 628 ±189 c	1 0110 ± 752 b
Cd0Zn600	3.93 ± 0.32 c	53.7 ± 10.3 b	3 204 ±799 b	1 1662 ± 894 a
Cd25Zn10	331 ± 16 b	989 ± 258 a	1 284 ±163 e	5 243 ± 443 d
Cd25Zn300	308 ± 39 b	1 186 ± 523 a	2 493 ± 167 cd	9 056 ± 309 c
Cd25Zn600	358 ± 72 b	1 092 ± 252 a	3 577 ± 252 b	9 658 ± 764 bc
Cd50Zn10	628 ± 90 a	1 268 ± 230 a	1 736 ± 356 de	5 914 ± 799 d
Cd50Zn300	721 ± 31 a	1 245 ± 384 a	4 237 ± 444 a	9 819 ± 429 bc
Cd50Zn600	690 ± 151 a	1 367 ± 327 a	3 790 ± 736 ab	9 997 ± 1 020 b

注：同列不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著，下同。

天各部位 Zn 浓度均显著高于 Zn10 处理；但相同 Cd 处理下，Zn300 和 Zn600 处理间差异不显著。伴矿景天生长在 Cd0Zn600 处理时，新叶中 Zn 浓度出现了最高值 17 962 mg/kg(图 1)。此外，所有处理成熟叶中 Zn 浓度均显著高于对照处理(Cd0Zn10)，但各处理间差异不显著。

2.1.2　不同处理伴矿景天不同部位 Cd 分布和浓度

Cd 在伴矿景天不同部位浓度没有一致的规律性，但新叶中 Cd 浓度均高于成熟叶、根及其他部位(图 1、表 2)。未添加 Cd 时，Zn10、Zn600 处理伴矿景天各部位 Cd 浓度为新叶>成熟叶>其他部位>根，而 Zn300 处理伴矿景天各部位 Cd 浓度从大到小的顺序为新叶>其他部位>成熟叶>根；在 Cd 为 25 μmol/L 时，所有 Zn 处理伴矿景天各部位 Cd 浓度从大到小的顺序均为新叶>其他部位>成熟叶>根；在 Cd 为 50 μmol/L 时，各 Zn 处理伴矿景天各部位 Cd 浓度均为新叶>其他部位>根>成熟叶。以上结果表明，伴矿景天体内 Cd 分布不仅与水培介质中 Cd 浓度有关，还与营养液 Zn 浓度有关。

所有处理均表现为新叶中 Cd 浓度高于成熟叶。当未添加 Cd 时，任何 Zn 处理新叶中 Cd 浓度略高于成熟叶；但当溶液中 Cd 浓度为 25 和 50 μmol/L 时，所有 Zn 处理新叶中 Cd 浓度显著高于成熟叶，但该两个 Cd 处理间差异不显著。新叶中 Cd 浓度最高可达 4 232 mg/kg (Cd50Zn300 处理)，为对照处理新叶中 Cd 浓度的 83 倍。随处理中 Cd 浓度的增加，根中 Cd 浓度也显著升高，而伴矿景天其他部位 Cd 浓度则是在 Cd25 和 Cd50 处理下显著高于未加 Cd 的对照处理(Cd0Zn10)，但 Cd25 和 Cd50 处理间差异不显著。

2.1.3　Zn、Cd 交互作用对伴矿景天 Zn、Cd 富集的影响　(1) 不同 Zn 处理对伴矿景天 Cd 浓度的影响。由图 1 和表 2 可见，当未添加 Cd 时，随着溶液中 Zn 浓度升高，伴矿景天各部位 Cd 浓度有逐渐增加的趋势，原因可能是由于添加的 Zn 试剂中含有 Cd[7]。当溶液中 Cd 浓度为 25 和 50 μmol/L 时，Zn 浓度对伴矿景天新叶中 Cd 浓度具有“低促高抑”效应，即

Zn300 低浓度处理促进新叶中 Cd 浓度的增加，而 Zn600 高浓度处理则降低了新叶中 Cd 浓度，尤其在 Cd 为 25 μmol/L 时，Zn300 处理新叶 Cd 浓度显著高于 Zn10 处理；而 Zn600 处理新叶 Cd 浓度显著低于 Zn300 处理；但对成熟叶、根及其他部位 Zn 的添加并没有显著改变 Cd 浓度(图 1 和表 2)。

(2) 不同 Cd 处理对伴矿景天 Zn 浓度的影响。相同浓度 Zn 处理下，随着溶液中 Cd 浓度的升高，伴矿景天新叶中 Zn 浓度逐渐降低，即 Cd 处理对新叶中 Zn 吸收具拮抗效应(图 1)。以溶液中 Cd 浓度为 x，伴矿景天新叶 Zn 浓度为 y，当溶液中 Zn 浓度为 10 μmol/L 时，$y = -247.45x + 4\ 400.9$ ($R^2 = 0.997$)；当溶液中 Zn 浓度为 300 μmol/L 时，$y = -3\ 622.6x + 21\ 082$ ($R^2 = 0.974\ 5$)；当溶液中 Zn 浓度为 600 μmol/L 时，$y = -2\ 617.4x + 20\ 398$ ($R^2 = 0.985\ 9$)，二者存在较好的相关性；而在相同浓度 Zn、不同浓度 Cd 处理下，伴矿景天成熟叶及其他部位 Zn 浓度没有显著变化；对于根则仅在 Zn 浓度为 300 μmol/L 时，Cd50 处理根中 Zn 浓度显著高于 Cd0、Cd25 处理，表现为一定的协同效应，但在其他 Zn 处理下，Cd 的添加对根中 Zn 浓度没有显著影响(图 1 和表 2)。

2.2　土培盆栽试验下 Zn、Cd 交互作用对伴矿景天生长与 Zn、Cd 吸收性的影响

2.2.1　不同 Zn、Cd 浓度及其交互作用对伴矿景天生长的影响　　在 S1 污染土壤(Zn 1 067 mg/kg，Cd 8.73 mg/kg)中添加 1 000 mg/kg Zn 没有影响伴矿景天生物量，但当添加量为 2 000 mg/kg 时显著抑制了植物生长；同样，在 Zn 高 Cd 低(Zn 3 906 mg/kg，Cd 10.6 mg/kg)的 S2 污染土壤中添加 Cd，也表现为随 Cd 添加量的增加，伴矿景天生物量呈现下降趋势；在所有处理中 Zn、Cd 高污染(4 444 mg/kg Zn，59.6 mg/kg Cd，未添加重金属)的 S3 处理伴矿景天生物量最大(图 2)。

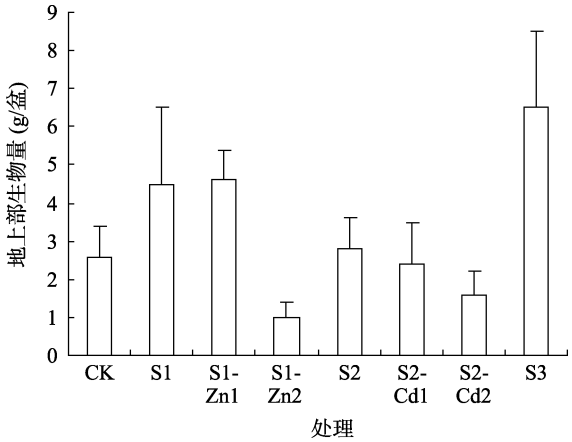


图 2　不同 **Zn、Cd** 处理对伴矿景天生物量的影响

Fig. 2　Plant biomass under different soil Zn, Cd treatments in pot experiment

2.2.2　不同 Zn、Cd 浓度及其交互作用对伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度的影响　　在 S1 污染土壤上添加 Zn 显著增大了伴矿景天地上部的 Zn 浓度，同时也促进了伴矿景天对 Cd 的吸收，但 1 000 mg/kg 和 2 000 mg/kg 的 Zn 添加量间没有显著差异；在 Zn 高 Cd 低的 S2 土壤上添加 Cd 则表现为随 Cd 添加量的增加伴矿景天体内 Cd 浓度显著升高，但 Cd 添加量对伴矿景天体内 Zn 浓度没有显著影响；在 Zn、Cd 高污染的 S3 土壤中伴矿景天体内 Zn 和 Cd 浓度显著低于相近污染程度的土壤外加重金属处理，表明外加 Zn、Cd 的有效性高于自然老化过的土壤(表 3)。

2.2.3　不同 Zn、Cd 浓度及其交互作用对伴矿景天 Zn、Cd 吸收量的影响　　比较所有处理伴矿景天的 Zn、Cd 吸收量结果均表现为 Zn 高则 Cd 高，Zn 低则 Cd 低的规律(表 3)；添加 Zn 显著促进伴矿景天对 Cd 的吸收，但添加量过大，由于显著抑制了伴矿景天的生长，伴矿景天的 Cd 吸收量显著降低；外加 Cd 对伴矿景天 Zn 吸收的拮抗效应，随土壤外加 Cd 量而增大，Zn 吸收量呈降低趋势(表 3)。

表 3　不同 **Zn、Cd** 处理对伴矿景天地上部 **Zn、Cd** 浓度和吸收量的影响

Table 3　Zn and Cd concentrations and uptake amounts of *S. plumbizincicola* shoots under different soil Zn and Cd treatments in pot experiment

处理	浓度 (mg/kg)		吸收量 (mg/盆)	
	Cd	Zn	Cd	Zn
CK	4.67 ± 2.00 c	126 ± 84 e	0.012 ± 0.000 f	0.33 ± 0.08 e
S1	34.6 ± 4.0 bc	1 138 ± 204 d	0.156 ± 0.001d	5.13 ± 0.40 d
S1-Zn1	84.8 ± 20.8 b	5 040 ± 635 a	0.383 ± 0.008 b	22.8 ± 0.6 a
S1-Zn2	82.7 ± 6.5 b	4 581 ± 793 ab	0.088 ± 0.001 e	4.88 ± 0.45 d
S2	63.4 ± 17.6 b	3 467 ± 586 c	0.171 ± 0.003 d	9.34 ± 0.55 c
S2-Cd1	177 ± 40 a	3 810 ± 866 bc	0.406 ± 0.016 b	8.74 ± 1.10 c
S2-Cd2	211 ± 90 a	3 088 ± 1 098 c	0.327 ± 0.029 c	4.80 ± 0.92 d
S3	77.4 ± 5.2 b	2 155 ± 276 d	0.499 ± 0.003 a	13.9 ± 0.5 b

4 讨论

Cd 是环境中毒性和移动性最强的重金属元素之一，进入植物可引起细胞 DNA 损伤和代谢紊乱[8]；Zn 是植物所必需的营养元素，参与植物体内代谢活动，但其浓度超过一定范围时也表现出对植物的毒害作用[9]。由于 Zn、Cd 有相似的物理结构和化学性质，因此当植物生长介质中两种元素共存时，在植物吸收及在植物体内迁移转运过程中产生交互作用。Li 等[4]及 Papoyan 等[10]的研究认为，Zn 可促进 *S. alfredii* 及 *T. caerulescens* 对 Cd 的吸收和转运。但因各研究的条件和对象不同，Zn、Cd 在植物吸收和积累上所表现的交互作用也不尽相同。

Cd 对植物吸收积累 Zn 影响，有研究表明在 Cd 处理浓度为 500 μmol/L 时，苗期龙葵对 Zn 的积累量最高，Cd 浓度继续增加，地上部 Zn 的积累量降低[11]。Wu 等[12]研究发现，溶液中 Cd 会降低大麦各部位的 Zn 含量，且抑制 Zn 由根向地上部运输。但 Mckenna 等[13]研究表明 Cd 处理能显著增加莴苣新叶中 Zn 浓度，而菠菜新叶中 Zn 浓度与溶液中 Cd 浓度无关；Combs[14]研究表明番茄叶中 Zn 浓度也与溶液中 Cd 浓度无关。在本研究水培试验中相同 Zn 浓度处理下，随着溶液中 Cd 浓度的增加，伴矿景天新叶中 Zn 浓度逐渐降低(图 1)；在低 Zn(10 μmol/L)处理下，添加 Cd 显著提高了成熟叶中 Zn 浓度，但在其他 Zn 浓度处理下 Cd 的添加没有对成熟叶中 Zn 浓度产生显著影响(图 1)；而对于根，则仅在溶液 Zn 浓度为 300 μmol/L 时，50 μmol/L 的 Cd 处理使根中 Zn 浓度要显著高于其他 Cd 处理，但在其他 Zn 处理水平下添加 Cd 没有对根中 Zn 浓度产生显著影响(表 2)。即在本研究中 Cd 对伴矿景天新叶中 Zn 浓度有显著性拮抗作用，而对成熟叶和根，则是在一定 Zn/Cd 值或范围时 Cd 对 Zn 会表现协同效应。由此可见，Cd 对伴矿景天吸收富集 Zn 的影响不仅与 Zn、Cd 浓度有关，且因伴矿景天植物组织部位的不同而异。在土培盆栽试验条件下，Cd 对伴矿景天 Zn 的吸收表现拮抗效应，并随土壤外加 Cd 量的增大，Zn 吸收量显著下降(表 3)，这主要是由于外加高量 Cd 活性或毒性较大，从而抑制伴矿景天的生长。

本研究中，水培试验中 Zn 浓度显著影响着伴矿景天新叶中 Cd 浓度(图1)。当溶液中没有添加 Cd 时，随着 Zn 添加量的增大，伴矿景天新叶中 Cd 浓度缓慢增加，原因可能是由于添加的 Zn 试剂中含有 Cd[7]。当溶液中 Cd 浓度为 25 和 50 μmol/L 时，Zn 浓度对伴矿景天新叶中 Cd 浓度具有“低促高抑”效应，对成熟叶、根及其他部位则没有这种效应(图 1 和表 2)。这与 Cakmak 等[15]研究结果相似，采用同位素示踪技术研究不同 Zn 水平对硬质小麦 ^{109}Cd 的转运，发现在不加 Zn 的对照中有 2.8% 的 ^{109}Cd 从叶片运输到包括根在内的植株的其他部位上，但是当 Zn 的浓度为 0.1 μmol/L 时，^{109}Cd 的运输率达到最大值(6.5%)；而当 Zn 的浓度增加到 1 和 5 μmol/L 时，^{109}Cd 的运输率又分别下降到 4.3% 和 1.3%。同时 Ye 等[16]研究表明当 Zn 的浓度小于 500 μmol/L 时能增加 *S. alfredii* 中 Cd 的浓度，添加更高 Zn 时植物根中 Cd 浓度降低但对叶却没有影响；Qiu 等[17]也报道外加 Zn 仅显著增加 *P. griffithii* 叶柄中 Cd 的积累。Welch 等[18]采用溶液培养法研究 Zn 对硬质小麦吸收、累积 Cd 的生理机制发现，当溶液中 Zn 浓度大于 1 μmol/L 时可明显抑制 Cd 从根的韧皮部运输，并认为这是导致小麦籽粒 Cd 含量降低的主要原因。Mckenna 等[13]研究表明施 Zn 可明显降低莴苣和菠菜根部对 Cd 的吸收，且减少 Cd 从根系的木质部运输到茎叶部。由于 Cd 与 Zn 有相同的价态(+2)和近似相同的离子半径，在植物细胞表面发生 Zn 竞争 Cd 位的协同作用，导致 Cd 的溶解性增强，促使 Cd 从根部向地上部转移[19]；此外，Cd 还可通过竞争 Zn 转运子上的位点而影响 Cd 的迁移[20]。在本研究土培试验中低量 Zn 的添加显著促进了伴矿景天地上部 Cd 的浓度和含量，但高量 Zn 同时也抑制了伴矿景天生长，降低了地上部 Cd 的含量(表 3)。

5 结论

水培条件下伴矿景天新叶中 Zn 和 Cd 浓度始终高于其他部位(除 Cd25Zn10、Cd50Zn10 处理成熟叶中 Zn 浓度高于新叶)，伴矿景天倾向于向地上部转运较多的 Zn 和 Cd，尤其是向新叶，这种分布可能与伴矿景天超积累 Zn 和 Cd 机制有关。Cd 处理对新叶中 Zn 浓度具有拮抗作用，而对成熟叶在低 Zn 时表现为促进效应，而在其他 Zn 水平时影响不显著；Zn 处理对新叶中 Cd 具有“低促高抑”作用，成熟叶及其他组织中则不存在这种现象。土培试验条件下，外加较低量 Zn 对伴矿景天生长影响不大，但较高量 Zn 抑制其生长；外加 Cd 表现为抑制作用；Zn 对伴矿景天体内 Cd 的浓度具有一定促进效应，添加 Zn 显著促进伴矿景天对 Cd 的吸收，但添加量过大 Cd 的吸收量显著降低；Cd 的添加对伴矿景天 Zn 的吸收存在拮抗效应。

参考文献：

[1] Chaney RL. Crop and food chain effects of toxic elements in sludges and effluents[A]. Proceedings of the Joint Conference on Recycling Municipal Sludges and Effluents on Land[C]. Washington DC：National Association of State Universities and Land-Grant Colleges, 1973: 129–141

[2] Mengel K, Kirkby EA. Principles of Plant Nutrition, Fifth edition[M]. Dordrecht, The Netherlands：Kluwer Academic Publishers, 2001

[3] Li TQ, Yang XE, Lu LL, Islam E, He ZL. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/3): 734–741

[4] Xu XH, Shi JY, Chen XC, Chen YX, Hu TD. Chemical forms of manganese in the leaves of manganese hyperaccumulator *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae)[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 197–204

[5] 李思亮, 李娜, 徐礼生, 谭维娜, 周守标, 吴龙华, 骆永明. 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[J]. 土壤, 2010, 42(3): 446–452

[6] 钟道旭, 韩存亮, 蒋金平, 林德喜, 吴龙华, 黄玉娟, 骆永明, 蒋玉根. 镀锌厂周围农田土壤-水稻中重金属污染及其风险[J]. 土壤, 2011, 43(1): 143–147

[7] Wu LH, Tan CY, Liu L, Zhu P, Peng C, Luo YM, Christie P. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure[J]. Geoderma, 2012, 173/174: 224–230

[8] 葛才林, 杨小勇, 孙锦荷, 王泽港, 罗时石, 马飞, 龚峥. 重金属胁迫引起的水稻和小麦幼苗 DNA 损伤[J]. 植物生理与分子生物学报，2002, 28(6): 419–424

[9] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 徐楠, 张小兰, 曾晓敏 . Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1): 5–8

[10] Papoyan A, Pineros M, Kochian LV. Plant Cd^{2+} and Zn^{2+} status effects on root and shoot heavy metal accumulation in *Thlaspi caerulescens*[J]. New Phytologist, 2007, 175(1): 51–58

[11] 裴昕, 郭智, 奥岩松. 镉锌复合污染对龙葵苗期生长和镉锌累积特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(7): 1 377–1 383

[12] Wu FB, Zhang GP, Yu JS. Interaction of cadmium and four microelements for uptake and translocation in different barley genotypes[J]. Communication of Soil Science and Plant Analysis. 2003, 34(13/14): 2 003–2 020

[13] Mckenna IM, Chaney RI, Williams FM. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach[J]. Environmental Pollution, 1993, 79(2): 113–120

[14] Combs SM. Use of a resin-buffered hydroponic culture to establish effects of Zn/Cd solution ratios on the Zn, Cd, and Cu content of tomato[D]. Ph.D Thesis. Univ. of Wisconsin-Madison, 1987

[15] Cakmak I, Welch RM, Erenoglu B, Römheld V, Norvell WA, Kochian LV. Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings[J]. Plant and Soil, 2000, 219(1/2): 279–284

[16] Ye HB, Yang XE, He B, Long XX, Shi WY. Growth response and metal accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn complex-polluted ion levels[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(9): 1 030–1 036

[17] Qiu RL, Thangavel P, Hu PJ, Senthilkumar P, Ying RR, Tang YT. Interaction of cadmium and zinc on accumulation and subcellular distribution in leaves of hyperaccumulator *Potentilla griffithii*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1 425–1 430

[18] Welch RM, Hart JJ, Norvell WA, Sullivan LA, Kochian LV. Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*) seedling roots[J]. Plant and Soil, 1999, 208(2): 243–250

[19] 艾伦弘, 汪模辉, 李鉴伦, 曾江萍. 镉及镉锌交互作用的植物效应[J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(12): 6–11

[20] Kupper H, Kochian LV. Transcriptional regulation of metal transport genes and mineral nutrition during acclimatization to cadmium and zinc in the Cd/Zn hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens* (Ganges population)[J]. New Phytologist, 2010, 185(1): 114–129

Interaction of Zn and Cd on Heavy Metal Phytoextraction Efficiency of *Sedum plumbizincicola*

LIU Yun-jun[1, 2], ZHONG Dao-xu[2], LI Zhu[2], LI Si-liang[2], GUO Feng-gen[1], WU Long-hua[2*]

(1 *School of Agriculture and Biological Technic*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*)

Abstract: Growth chamber hydroponics culture and glass house pot experiment with Zn and Cd polluted agricultural soil were used to study the interaction effects of different Zn and Cd concentrations on *Sedum plumbizicola* growth, Zn and Cd uptake and distribution in plant. Hydroponics culture results showed that Zn and Cd concentrations in all part of plant increased significantly with Zn and Cd concentration in hydroponics solution, but there were no significant differences between the two high concentration treatments; the uneven Zn distribution was found in the plant and had relationship with Zn and Cd concentration in the hydroponic solution, for the concentration of Zn > Cd in the solution, Zn concentrations in plant were as following: the young leaves > mature leaves> the other parts >> roots, on the contrary, the order showed as: mature leaves > other parts > young leaves >> roots; Cd distribution in the plant different parts had no consistent regularity; the interaction of Cd and Zn is mainly reflected on the young leaves: when the solution was presented with Cd, low Zn concentration in solution had synergy effects on Cd concentration in young leaves, and high Zn had antagonistic effect; Cd also had antagonistic effect on Zn concentration in young leaves. The soil pot experiment results also showed that the high Zn could promote plant Cd uptake, and Cd had antagonistic effect on the uptake of Zn. Extremely high Zn or Cd would significantly inhibit plant growth, and thus lower remediation efficiency.

Key words: *Sedum plumbizincicola*, Zn, Cd, Interaction, Uptake, Distribution