

几种有机添加剂对遏蓝菜和东南景天吸收提取 Zn 的效应

邓金川, 吴启堂*, 龙新宪, 卫泽斌

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:通过盆栽试验, 比较研究乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA)、味精废液、柠檬酸、乙酸、草酸和混合试剂(柠檬酸: 味精废液: EDTA: KCl=10: 1: 2: 3)对 Zn 超累积植物遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)和东南景天(*Sedum alfredii*)吸收提取 Zn 的影响。结果表明: 各种添加剂均提高土壤中的水提取态和 NH₄NO₃ 提取态 Zn 的含量, 其顺序为 EDTA>>混合试剂>味精废液>有机酸。除乙酸和味精废液外, 其余添加剂都显著促进遏蓝菜的生长, 以混合试剂的增产效果最好; 但只有 EDTA 和混合试剂在浓度为 10mmol/kg 土时提高了东南景天的生物量。混合试剂在浓度为 6~10 mmol/kg 土时促进遏蓝菜对 Zn 的吸收和向地上部转移; EDTA 和浓度为 10mmol/kg 的混合试剂能显著促进东南景天对 Zn 的吸收和向地上部的转移。因此东南景天配合环境风险较小、用量为 10mmol/kg 土的混合试剂较适合我国南方的 Zn 污染土壤。

关键词:植物提取; 东南景天; 遏蓝菜; 添加剂; Zn

文章编号: 1000-0933(2005)10-2562-07 中图分类号: Q143, Q948, X171 文献标识码: A

Effects of organic chelates on zinc uptake and accumulation by *Thlaspi caerulescens* and *Sedum alfredii*

DENG Jin-Chuan, WU Qi-Tang*, LONG Xin-Xian, WEI Ze-Bin (College of Natural Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2562~2568.

Abstract: Chelate-enhanced phytoextraction is one of the most promising technologies to remove heavy metals from soil, which adds chelates to enhance hyperaccumulation by plants. The key of the technology is to choose suitable chelates and the combining-hyperaccumulator. Several studies have documented that chelating agents such as ethylene diamine triacetic acid (EDTA) and citric acid can be used to increase metal mobility, thereby enhancing phytoextraction, with the special emphasis on EDTA due to its significant enhancing effect. But EDTA is not cheap and can cause underground water contamination, so “greener” or/and cheaper enhancing chelates are to be exploited. Pot experiments were conducted to examine the effects of various organic chelates, including EDTA (ethylenediamine tetraacetic acid), citric acid, acetic acid, oxalic acid, monosodium glutamate waste water (MGWW) and a mixture of additives (molar ratio of citric acid, MGWW, EDTA and KCl = 10: 1: 2: 3), on Zn uptake by two Zn-hyperaccumulating plants *Thlaspi caerulescens* and *Sedum alfredii*. The soil used for the experiment was collected from a paddy field that has been contaminated by heavy metal-laden mine water from a lead/zinc mine in the northern Guangdong Province of China. The application rate was 6 mmol equivalent per kg soil except for the mixed

基金项目:国家 863 资助项目(2001-AA-640501-3); 中法先进科技研究合作计划资助项目(PRA-E-03-02); 广东省自然科学基金资助项目(021007)

收稿日期:2004-07-11; **修订日期:**2005-02-20

作者简介:邓金川(1976~), 女, 湖南人, 硕士, 博士生, 主要从事土壤重金属污染及植物修复研究. E-mail: dengjc@hotmail.com

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

致谢:法国国立洛林理工大学(INPL)土壤与环境实验室的 J. L. Morel 教授、浙江大学环境与资源科学学院的杨肖娥教授分别提供了遏蓝菜和东南景天植物材料, 华南农业大学资源环境学院澳大利亚籍特聘教授林初夏博士对本文的修改给予帮助, 在此表示衷心感谢

Foundation item: 863 Project of Ministry of Science and Technology of China (No. 2001-AA-640501-3), Chinese-French Programme de Recherche Avancee (No. PRA-E-03-02) and Natural Science Foundation of Guangdong Province

Received date: 2004-07-11; **Accepted date:** 2005-02-20

Biography: DENG Jin-Chuan, Ph. D. candidate, mainly engaged in phytoremediation. E-mail: dengjc@hotmail.com

additives, which was applied in a series of concentrations varied from 2 to 14 mmol equivalent per kg soil. The results show that addition of chelates increased water- and NH_4NO_3 -extractable Zn in the soil, and the capacity of chelates to mobilize Zn was in the following decreasing order: EDTA $\gg$ mixed additives $\gg$ MGWW $\gg$ organic acids. Except for MGWW and acetic acid, all the chelates enhanced the growth of *Thlaspi caerulescens*, especially the mixed additives. However, only EDTA and the mixed additives at 6 mmol/kg had effects on increasing the biomass of *Sedum alfredii*. Addition of the mixed additives at 6~10 mmol/kg increased the Zn uptake by *Thlaspi caerulescens* and the accumulation of Zn in the above-ground portion of the plant. While EDTA and the mixed additives at 10 mmol/kg significantly increased Zn uptake by *Sedum alfredii* and the accumulation of Zn in the above-ground portion of the plant. Zn extraction efficiency of *Sedum alfredii* was higher than that of *Thlaspi caerulescens*. This work suggests that the use of mixed additives at 10 mmol/kg to treat the contaminated soils for the growth of *Sedum alfredii* gives the best effects on the clean-up of the investigated Zn-contaminated soil among all the treatments in this study because it reduces the environmental risk due to secondary contamination by EDTA while maximizing the removal of Zn from the contaminated soil.

Key words: phytoextraction; *Thlaspi caerulescens*; *Sedum alfredii*; chelates; Zn

植物提取技术是指利用重金属超累积植物从土壤中吸取一或几种重金属,并将重金属转移、贮存到植物地上部,随后收割地上部并集中处理,连续种植这种植物,可使土壤中重金属含量降低到可接受水平^[1, 2]。该技术以其成本低、原位修复、环境友好等特点成为环境学和生态学中的研究热点,并在治理土壤重金属污染方面有着广泛的发展前景。植物提取技术的提取效益取决于超累积植物地上部分生物量及其重金属含量。一方面,通过施肥提高超累积植物(*Streptanchus polygaloides*、*Alyssum bertolonii*、*Thlaspi caerulescens*)的生物量^[3]。另一方面,采用在重金属污染土壤中加入螯合剂来提高植物中的重金属含量^[4~8],这种措施在盆栽和野外均取得满意的结果,但是目前人们还未找到一种比较满意的螯合剂。

本研究以铅锌矿废水污染的水稻土为供试土壤,研究多种来源的螯合剂对遏蓝菜和东南景天吸收重金属 Zn 的影响,以期找到一种适合植物修复技术的螯合剂及其配套的超富集植物。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物 两种 Zn/Cd 超富集植物,分别为:①遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*),来自法国,将遏蓝菜种子播入有培养基质的孔塞中,培养 1~2 个月,待遏蓝菜长出第 4 或第 5 真叶时,将遏蓝菜连同基质移入盆中;②东南景天(*Sedum alfredii*),采自浙江省^[9],盆栽时剪取相同枝条直接插枝。

供试土壤 取自广东韶关乐昌铅锌矿污染的水稻田,土壤采自耕作层 0~20cm,风干过筛,充分混匀。该土壤的基本理化性质见表 1。其分析方法参照《土壤农业化学分析法》^[10]。该土壤属于重度重金属复合污染。

表 1 乐昌重金属污染水稻土的基本理化性质

Table 1 Basic properties of the metal contaminated paddy soil from Lechang									
有机质 Organic matter (g/kg)	全 N Total-N (g/kg)	全 P Total-P (g/kg)	全 K Total-K (g/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	全 Zn Total-Zn (mg/kg)	全 Cd Total-Cd (mg/kg)	全 Pb Total-Pb (mg/kg)	全 Cu Total-Cu (mg/kg)
5.53	3.03	0.961	12.5	7.54	18.4	1427	7.46	4110	80

供试试剂 EDTA、味精废液(取自广州市味精厂,含 68.94g 谷氨酸钠/L,pH5.23)、柠檬酸、乙酸、草酸以及混合试剂(柠檬酸、味精废液、EDTA、KCl 摩尔比=10:1:2:3^[11])。

1.2 试验方法

盆栽试验采用白色塑料花盆(A210),每盆污染水稻土(过 5mm 筛)的用量为 1.5kg。化肥分别采用尿素和 KH_2PO_4 (均为分析纯),用作基肥与土混匀,其用量分别为:100mg N/kg 土、80mg P_2O_5 /kg 土和 100mg K_2O /kg 土。2002 年 11 月 6 日移栽遏蓝菜,每盆 6 株,共设 10 个处理,分别为:不种植物、无添加剂(CK)、EDTA、柠檬酸、乙酸、味精废液、草酸、3 个浓度水平的混合试剂 I~Ⅲ,除混合试剂存在浓度梯度(分别为 2mmol/kg、6mmol/kg、10mmol/kg)外,其余试剂均保持等当量用量(即 6mmol/kg 土)。试验为 4 次重复,共 40 盆,随机区组排列。

东南景天盆栽试验采用直接插枝方式,枝条大小均匀,每盆 3 株,设 11 个处理,前 10 个处理与遏蓝菜试验相同,另增加一个处理为:混合试剂 IV,浓度为 14mmol/kg。其余与前一实验相同。

上述试剂分两次加入。盆栽 75d 后,待东南景天和遏蓝菜进入生长旺季根系发达时,于 2003 年 1 月 20 日加入第 1 次试剂。15d 后即 2003 年 2 月 4 日第 2 次加入试剂。2003 年 2 月 21 日收获植物(盆栽时间共为 106d),其中遏蓝菜分地上部和根分别采样,东南景天分叶、茎和根分别采样。同时采用四分法采集盆栽土壤样品,自然风干后粉碎过筛,备用。植物样品用双蒸馏水洗净后,称鲜重,于 60℃烘干后,称干重,磨细,以备测植物中全量 Zn 之用。

盆栽土壤中 Zn 采用化学提取方法^[12]:(1)1:2.5 土水比提取水提取态 Zn,以每分钟 120 次振荡 2 小时,7000 r/min 离心 10 min,慢速滤纸过滤;(2)土液比 1:2.5 的中性 1mol/L NH₄NO₃ 提取 NH₄NO₃ 提取态 Zn,其余同(1)。滤液中的 Zn 用原子吸收分光光度计测定,同时采用玻璃电极法测定土壤的 pH 值。

植物中全量 Zn 采用干灰化-稀盐酸溶解法^[10],用原子吸收分光光度计测滤液中的 Zn。

1.3 数据处理

本文的结果为 4 次重复的平均值,采用 SAS8.0 软件对数据进行方差分析,用 Dunan 氏新复极差法(SSR)做多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同添加剂对盆栽土壤中水提取态和 NH₄NO₃ 提取 Zn 含量的影响

由表 2 可知,各种试剂的加入均极显著提高盆栽土壤中水提取态 Zn,各处理的 Zn 含量大小顺序为:EDTA>>混合试剂>味精废液>3 种酸>CK。EDTA 与 Zn 有着非常强的亲合能力,与种植物的对照相比,EDTA 使土壤中水提取态 Zn 含量增加近千倍;同时,混合试剂对土壤中的 Zn 也有很强的活化能力,并且随着混合试剂浓度的增加(混合试剂 I~IV),土壤中的水提取态 Zn 含量也相应呈直线增加;味精废液对 Zn 有一定的活化能力,但其 Zn 含量低于混合试剂;柠檬酸、乙酸和草酸处理的水提取态 Zn 含量与对照相比无显著差异。水提取态 Zn 高有利于植物吸收,但也增加淋溶对水体的污染,如果植物吸收量相同,则以水提取态 Zn 低的为好。该结果表明,混合试剂对地下水污染的风险明显小于 EDTA。

各种试剂对盆栽土壤中的 NH₄NO₃ 提取态 Zn 含量的影响与对水提取态 Zn 含量的影响基本相似(表 2)。

另外,无论是土壤中的水提取态 Zn 还是 NH₄NO₃ 提取态 Zn,不种植物的对照均比种植植物的对照高(见表 2),说明种植 2 种超富集植物明显降低了污染土壤中速效 Zn 的含量。

表 2 不同添加剂对土壤水提取态和 NH₄NO₃ 提取态 Zn 含量的影响
Table 2 Effect of different chelates on the water- and NH₄NO₃- extractable Zn content in soil

处理 Treatment	水提取态 Zn Water-extractable Zn(mg/kg)		NH ₄ NO ₃ 提取态 Zn NH ₄ NO ₃ -extractable Zn(mg/kg)	
	遏蓝菜 <i>T. caerulescens</i>	东南景天 <i>S. alfredii</i>	遏蓝菜 <i>T. caerulescens</i>	东南景天 <i>S. alfredii</i>
无添加剂 CK	0.034±0.014 e	0.064±0.040 f	0.605±0.011 d	0.474±0.046 e
EDTA	33.57±0.49 a	43.85±1.90 a	38.53±1.73 a	46.38±1.44 a
柠檬酸 Citric acid	0.035±0.004 e	0.565±0.020 f	0.593±0.013 d	1.027±0.012 e
乙酸 acetic acid	0.271±0.074 e	0.031±0.010 f	0.893±0.020 d	0.480±0.034 e
草酸 oxalic acid	0.105±0.028 e	0.062±0.010 f	0.589±0.024 d	0.528±0.013 e
味精废液 MGWW	1.593±0.167 d	1.140±0.030 f	2.295±0.132 d	1.766±0.050 e
混合试剂 I mixed reagent I	2.215±0.091 d	2.180±0.092 f	2.297±0.100 d	2.571±0.076 e
混合试剂 II mixed reagent II	5.141±0.57 c	6.272±0.363 e	5.305±0.332 c	7.360±0.451 d
混合试剂 III Mixed reagent III	8.083±0.080 b	9.029±0.404 d	12.538±0.226 b	9.890±0.254 c
混合试剂 IV mixed reagent IV	—	16.35±0.55 c	—	19.30±0.64 b
不种植物 Non-plant	0.242±0.022		0.871±0.033	

表中数值为平均值,±后为标准差;mean±STD;根据 Dunan 氏检验($p=0.05$),带有相同字母的平均值间差异不显著 According to Duncan's test ($p=0.05$), means followed by the same letter were not significantly different; MGWW monosodium glutamate waste water;下同 the same below

2.2 添加剂对遏蓝菜和东南景天生物量的影响

添加剂的施用对遏蓝菜和东南景天的生物量产生显著影响,但两种植物对添加剂的适应能力不一样(表 3)。

对于遏蓝菜,EDTA、柠檬酸和混合试剂 I~Ⅲ都显著地提高其总生物量,其中混合试剂 I~Ⅲ对遏蓝菜增产效果最为显著,随着混合试剂浓度(混合试剂 I~Ⅲ)的增加,遏蓝菜的总生物量也相应比对照(CK)分别提高 23.14%、32.86%和 46.57%;但是乙酸和味精废液却严重抑制遏蓝菜的生长,加入试剂 3d 后,遏蓝菜的叶片开始失水枯萎,收获时有个别株已死亡,乙酸和味精废液处理的总生物量分别比对照低 23.43%、10.00%。

然而对于东南景天,只有 EDTA 和混合试剂 Ⅲ提高了其生物量,但增产的幅度很小,分别只有 4.69%和 5.16%;其余处理的总生物量均低于对照(CK),其中味精废液处理的生物量最少,竟比对照减少 51.09%。

表 3 不同添加剂对遏蓝菜和东南景天生物量的影响(干重计,g/pot)

处理 treatment	遏蓝菜 <i>T. caerulescens</i>			东南景天 <i>S. alfredii</i>			
	地上部	根系	总生物量	叶	茎	根系	总生物量
	Shoot	Root	Total biomass	Leaf	Stem	Root	Total biomass
无添加剂 CK	3.13 cde	0.37 bc	3.50 cd	3.31 abc	2.78 ab	0.31 a	6.40 ab
EDTA	3.34 bcd	0.44 ab	3.78 c	3.47 ab	2.94 a	0.30 a	6.70 a
柠檬酸 Citric acid	3.36 bcd	0.42 bc	3.78 c	2.67 abc	2.46 ab	0.25 a	5.37 bc
乙酸 Acetic acid	2.42 e	0.26 d	2.68 e	2.41 c	2.16 b	0.23 a	4.80 c
草酸 Oxalic acid	3.26 bcde	0.33 cd	3.60 cd	2.58 bc	2.16 b	0.25 a	4.99 c
味精废液 MGWW	2.89 de	0.26 d	3.15 d	1.57 d	1.43 c	0.13 b	3.13 d
混合试剂 I Mixed reagent I	3.89 abc	0.42 bc	4.31 bc	2.88 abc	2.64 ab	0.23 a	5.74 b
混合试剂 II Mixed reagent II	4.14 abc	0.52 a	4.65 ab	2.78 abc	2.70 ab	0.31 a	5.78 b
混合试剂 III Mixed reagent III	4.62 a	0.52 a	5.13 a	3.53 a	2.93 a	0.28 a	6.73 a
混合试剂 IV Mixed reagent IV	—	—	—	2.88 abc	2.28 ab	0.28 a	5.43 bc

2.3 添加剂对遏蓝菜和东南景天 Zn 浓度的影响

遏蓝菜和东南景天吸收 Zn 的情况很相似,均是地上部大于根系,地上部对 Zn 的富集系数大于 1,并且两种植物吸收 Zn 的能力比较接近(见图 1 和图 2)。图 1 表明,遏蓝菜地上部 Zn 含量/根系 Zn 含量的值为 2.47~4.93,这与沈振国^[13]的研究结果一致,并且遏蓝菜地上部对 Zn 富集系数(地上部 Zn 含量与土壤全量 Zn 含量的比值)在 3.28~5.28 范围内。图 2 显示,东南景天的 Zn 含量以茎>叶>根,这与龙新宪^[14]的结果(叶≈茎>根)有差异,并且其叶和茎对 Zn 的富集系数分别在 2.47~4.27 和 3.38~4.96 范围内。

添加剂对遏蓝菜吸收 Zn 产生显著影响。从图 1 可看出,柠檬酸、乙酸、草酸和混合试剂 II 促进遏蓝菜根系中 Zn 的含量,其中以柠檬酸处理的根系 Zn 含量最高,与对照相比,该处理的根系 Zn 含量增加 516mg/kg,但柠檬酸对地上部 Zn 含量没有影响。混合试剂 II 和 III 的加入显著提高了地上部 Zn 含量,其地上部 Zn 含量分别比对照的 Zn 含量增加 558mg/kg、394mg/kg。这表明,混合试剂 II 和 III 促进遏蓝菜对 Zn 的吸收并利于 Zn 向地上部转移。

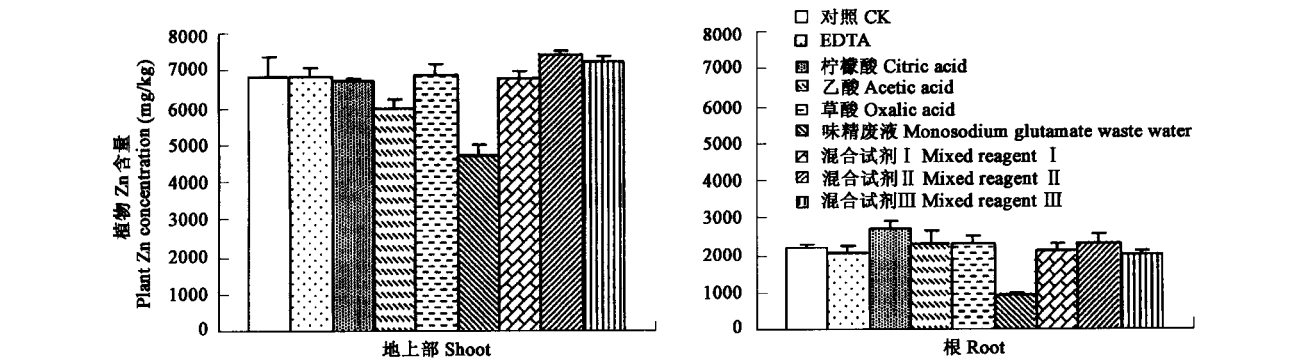


图 1 遏蓝菜各部分的 Zn 含量
Fig. 1 Zn concentration in the shoot and root of *Thlaspi caerulescens*

同样,添加剂对东南景天的 Zn 含量产生显著影响。在所有处理中,EDTA 处理的根、茎、叶 Zn 含量均是最高,分别比对照高出 494mg/kg、2221mg/kg、1667mg/kg,并且与对照有极显著差异。与对照相比,混合试剂 IV 和柠檬酸分别使东南景天茎、叶 Zn 含量有显著增加,但对根系 Zn 含量无影响。这说明,EDTA、混合试剂 IV 能显著促进东南景天对 Zn 的吸收和向地上部转移,而柠檬酸利于 Zn 由根系向地上部的迁移。

2.4 添加剂对遏蓝菜和东南景天累积 Zn 的影响

东南景天地上部对 Zn 的累积量高于遏蓝菜(见图 3),主要是由于东南景天地上部生物量较大。在比例上,遏蓝菜地上部 Zn 的累积量占总累积量的 95% 以上,东南景天地上部 Zn 的累积量占总累积量的 98% 左右。

另外添加剂对两种植物地上部 Zn 的累积量有显著影响。由图 3 可知,除乙酸和味精废液外,其余试剂的加入均使遏蓝菜地上部 Zn 累积量增加,尤其是混合试剂 I ~ III,随着混合试剂浓度的增加,Zn 的累积量也上升。但是对于东南景天来说,只有 EDTA 和混合试剂 III 显著提高了其地上部的 Zn 累积量(图 3),其中 EDTA 处理比对照增加 10.98mg/盆。

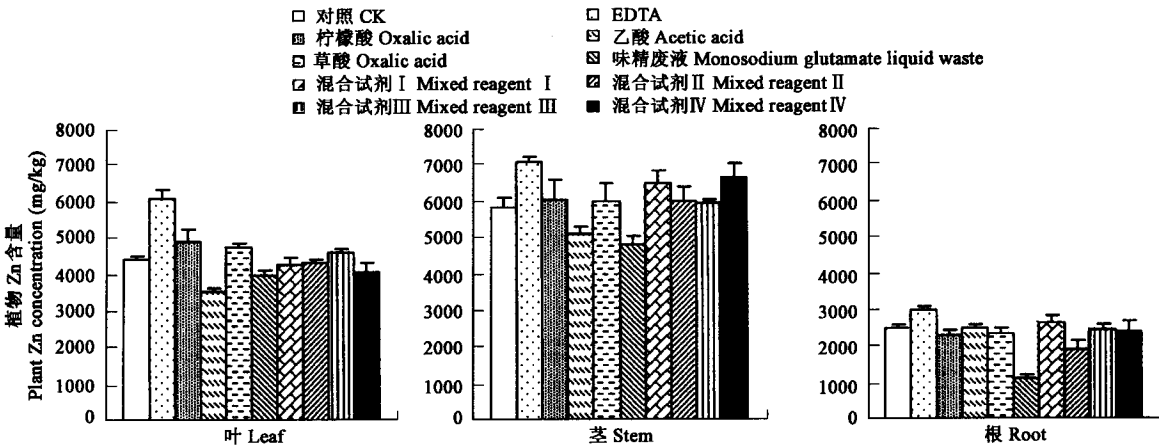


图 2 东南景天各部分的 Zn 含量

Fig. 2 Zn concentration in the leaf, stem and root of *Sedum*

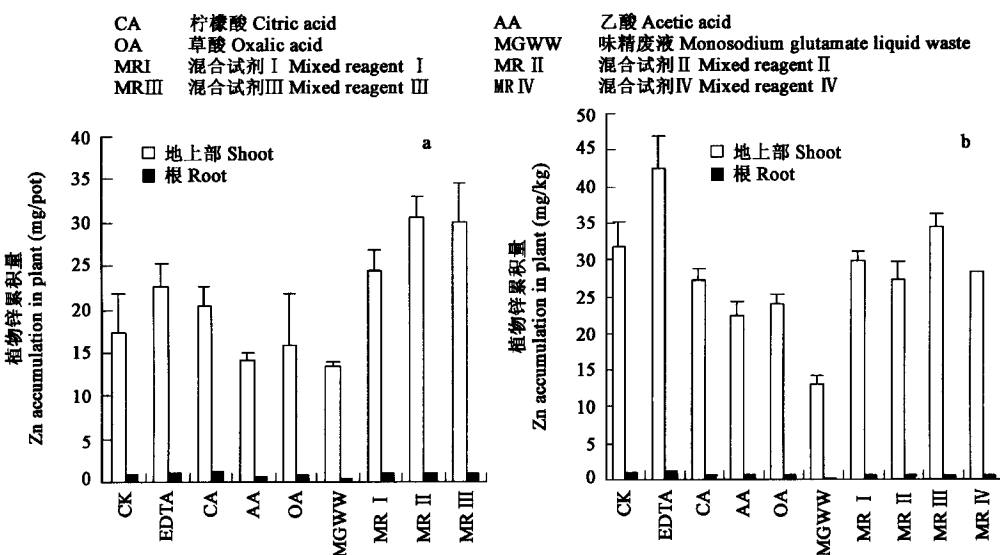


图 3 遏蓝菜(a)和东南景天(b)地上部和根系对 Zn 的累积量

Fig. 3 Accumulation of Zn in the shoot and roots of *Thlaspi caerulescens* (a) and *Sedum affredii* (b)

添加剂对遏蓝菜和东南景天提取土壤中的 Zn 的效率影响显著(表 4)。遏蓝菜对 Zn 的提取效率为 0.93%~2.13%，其中混合试剂的加入显著提高遏蓝菜对 Zn 的提取效率，以混合试剂Ⅲ处理的提取效率最高，若以遏蓝菜在我国华南地区一年种植两季进行计算，则遏蓝菜每年对土壤中 Zn 的提取效率最高可达 4.26%。东南景天对 Zn 的提取效率为 0.92%~2.96%，以 EDTA 处理为最高，若以东南景天在我国一年收割 3 次进行计算，则每年东南景天提取 Zn 的效率可达 8.88%。

表 4 遏蓝菜和东南景天对土壤 Zn 的提取效率 (%)^[15]

Table 4 Zn extraction efficiency[#] of one crop of *Thlaspi caerulescens* and *Sedum affredii*^[15]

处理 Treatment	CK	EDTA	柠檬酸 Citric acid	乙酸 Acetic acid	草酸 Oxalic acid	味精废液 MGWW	混合试剂 I Mixed reagent I	混合试剂 II Mixed reagent II	混合试剂 III Mixed reagent III	混合试剂 V Mixed reagent V
遏蓝菜 <i>T. caerulescens</i>	1.20±0.32	1.57±0.19	1.41±0.17	0.99±0.06	1.09±0.42	0.93±0.04	1.70±0.18	2.13±0.17	2.10±0.32	—
东南景天 <i>S. affredii</i>	2.21±0.24	2.96±0.32	1.90±0.11	1.55±0.15	1.66±0.11	0.92±0.07	2.07±0.10	1.90±0.18	2.41±0.13	1.98±0.27

参考杨清伟^[15]：提取效率=植物地上部的 Zn 累积量/((土壤总 Zn 含量-土壤 Zn 的二级标准)×土重)；表中数值为：平均值±标准差；According to Yang *et al*^[15]，Zn extraction efficiency = Zn accumulation in plant shoot/((total Zn in soil-Zn standard of agricultural soil)×soil weight)；MGWW: monosodium glutamate waste water；The values in the table were mean± standard deviation

3 讨论与结论

添加剂的施用均提高了土壤中 Zn 的活性,尤其是 EDTA 能使土壤 Zn 的活性增加近千倍,其对 Zn 活化能力的大小顺序是:EDTA>>混合试剂>味精废液>柠檬酸、乙酸、草酸≈对照。添加剂对 Zn 的活化能力主要来自添加剂对 Zn 的螯合能力,EDTA 与 Zn 的螯合平衡常数要高出其他试剂许多。Wenger^[16]发现在相同 pH 条件下,NTA (naphthalenetrisulfonic acid, 萘三磺酸)活化出来的 Zn 含量要比其他试剂(柠檬酸、草酸、邻苯二甲酸等)高 15 倍左右,其原因在于 NTA 与 Zn 的螯合常数高于其他试剂。虽然土壤 Zn 浓度大量增加,却没有抑制遏蓝菜和东南景天的生长甚至有增产效果(除乙酸和味精废液外),这可能在土壤溶液中大量增加的是添加剂与 Zn 形成的毒性小的螯合物,而毒性强的游离态的 Zn 变化较小。

土壤溶液中 Zn 浓度的提高相应导致植物体内 Zn 含量的上升。在 1~1224μmol/L Zn 范围内,东南景天地上部含量随营养液中 Zn 浓度的增加而增加^[9],同时一些研究表明,螯合剂的施用在提高土壤重金属浓度的同时也使植物体内重金属含量增加十倍甚至百倍以上^[4~7,17, 23]。在本次试验中,混合试剂Ⅱ使遏蓝菜地上部 Zn 增加,EDTA 则提高了东南景天体内的 Zn 含量。但是遏蓝菜和东南景天的 Zn 含量增加的比例很小,远低于土壤溶液中 Zn 增加的比例,这与前面的研究结果不同,而与 Wenzel 等^[18]的研究一致。因此,EDTA 可造成地下水污染;表 2 中的数据显示了植物吸收后土壤残留的水溶态 Zn 含量,该值除以水土比 2.5 可得 EDTA 处理的土壤淋出液 Zn 浓度,达 13~17mg/L,明显高于我国地下水标准中饮用水要求的 1 mg/L(Ⅲ级)或工农业用水要求的 5mg/L(Ⅳ级),有必要研究开发对地下水环境影响更小的添加剂。

同一添加剂对遏蓝菜和东南景天吸收 Zn 有不同的影响效果。在本次试验中,相同条件下,EDTA 能促进东南景天吸收 Zn 但对遏蓝菜却没有效果,而混合试剂对东南景天效果小却能显著促进遏蓝菜吸收 Zn,Ebbs 等^[19]、Römkens 等^[20]和龙新宪^[13]的研究也发现同样的现象,这可能是植物的生理和生活习性不同,吸收不同的 Zn 形态。综合生物量和植物 Zn 含量,混合试剂Ⅲ和 EDTA 分别提高了遏蓝菜和东南景天对 Zn 的修复效率。混合试剂Ⅲ不仅可以提高超富集植物的 Zn 浓度,而且提高植物的生物量最明显(表 3),从而可显著提高 Zn 的修复效率。

值得注意的是,虽然在本次试验中味精废液严重抑制植物的生长未能获得好的效果,但是味精废液对土壤中的 Zn 有较强的活化能力,且含有大量的有机物,正被研制为一种新型的有机肥^[21,22],因此若调整味精废液的使用浓度或去除其有害成分,可能实现既提高植物的生物量又促进植物吸收重金属,最终能提高植物提取效率,达到以废治废的目的。

遏蓝菜是法国引进种,较难适应中国的气候条件,生长慢,生物量小,易生虫害,在本次试验中对 Zn 修复效率不高;而东南景天在中国广泛分布,可无性繁殖,生长快,生物量较大,虫害少,对 Zn 的修复效率较高。因此,在中国东南景天比遏蓝菜更适合用于 Zn 污染土壤的植物修复。而且,与用量为 10mmol/kg 的混合试剂配合较好,因为该试剂对地下水污染的风险明显小于 EDTA。

References:

[1] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents, In: Parr J. F. ed. *Land Treatment of Hazardous Wastes*. Noyes Data Corp, Park Ridge, NJ., 1983. 50~76.

[2] Baker A J M, Reeves R D, McGrath S P. *In situ* decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants—a feasibility study. In: Hinchey R E and Olfenbittel R F eds. *In situ Bioreclamation*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 539~544, 600~605.

[3] Bennett F A, Tyler E K, Brooks R R, *et al.* Fertilisation of hyperaccumulators to enhance their potential for phytoremediation and phytomining. In: Brooks R R ed. *Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals*. UK: CAB international, 1998. 249~259.

[4] Huang J W, Cunningham S D. Lead phytoextraction: Species variation in lead uptake and translocation. *New Phytol.*, 1996, **134**: 75~84.

[5] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.*, 1997, **31**:860~865.

[6] Chen H, Cutright T. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by *Helianthus annuus*. *Chemosphere*, 2001, **45**: 21~28.

[7] Wu L H, Luo Y M, Wong J W C, *et al.* Chelate-induced phytoextraction of copper contaminated upland red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(3): 435~438.

[8] Jarvis M D, Leung D W M. Chelated Lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, **48**: 21~32.

[9] Yang X E, Long X X, Ni W Z, *et al.* *Sedum alfredii*——a new Zn hyperaccumulator. *China Science Bulletin*, 2002, **47**(13): 1003~1006.

[10] Lu R K ed. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[11] Wu Q T, Deng J C, Long X X. The research and apply of mixed chelates to enhance the Zn/Cd phytoremediate efficiency. Open code: CN 1513946A,2004.

[12] Sun B, Zhao F J. Young S D. Availability and fixation of Zn and Cd in soils amended with metal sulfate, International Conference of Soil Remediation. October 15-19, Hangzhou, China, 2000. 354~365.

[13] Shen Z G, Liu Y L, Chen H M. Effects of chelates EDTA and DTPA on the uptake of zinc, copper, manganese and iron by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1998, **24**(4): 340~346.

[14] Long X X, Ni W Z, Ye Z Q, *et al*. Effect of organic acids application on zinc uptake and accumulation by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. *J. Plant Nutrition and Fertilization*, 2002, **8**(4): 467~472.

[15] Yang Q W, Shu W S, Lin Z, *et al*. Ecological impact of compound pollution of heavy metals from mining liquid waste to soil-rice system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(4): 385~390.

[16] Wenger K, Hari T, Gupta R, *et al*. Possible approaches for in situ restoration of soils contaminated by Zinc. ISCO-Proc. 1997, 23~26.

[17] Blaylock M J, Huang J W. Phytoextraction of metals. In: Raskin I & Ensley B eds. *Phytoremediation of Toxic Metals-Using Plants to Clean Up the Environment*. New York: John Willey & Sons, Inc. , 2001. 60~67.

[18] Wenzel W W, Unterbrunner R, Sommer P, *et al*. Chelate-assisted phytoextraction using canola(*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. *Plant and Soil*, 2003, **249**: 83~96

[19] Ebbs S D, Kochian L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Environ. Sci. Technol.* , 1998, **32**: 802~806

[20] Römkens P, Bouwman L, Japenga J. *et al*. Potential and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils. *Environmental Pollution*, 2002, **116**:109~121

[21] Tang H H, Lin H Y, Yang M L. Effects of monosodium glutamate liquid waste on the growth of rice. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 1994, **5**: 32.

[22] Zhang M G, Huang Q S. Effect of liquid waste from monosodium glutamate production on the growth of pakchoi. *Journal of South China Normal University (natural science edition)*, 2000, **3**: 81~84.

[23] Chen Y X, Lin Q, Luo Y M,*et al*. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*,2003, **50**:807~811.

参考文献：

[7] 吴龙华, 骆永明, 黄焕忠. 铜污染旱地红壤的络合诱导植物修复作用. 应用生态学报, 2001, **12**(3):435~438.

[9] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii*)一种新的 Zn 超积累植物. 科学通报, 2002, **47**(13):1003~1006.

[10] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析法. 北京:中国农业出版社, 2000.

[11] 吴启堂, 邓金川, 龙新宪. 提高土壤锌、镉污染植物修复效率的混合添加剂及其应用. 2004. 公开号: CN 1513946A.

[13] 沈振国, 刘友良, 陈怀满. 螯合剂对重金属超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 的 Zn、Cu、Mn 和 Fe 吸收的影响. 植物生理学报, 1998, **24**(4):340~346.

[14] 龙新宪, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 外源有机酸对两种生态型东南景天吸收和积累 Zn 的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(4):467~472.

[15] 杨清伟, 束文圣, 林周, 等. 铅锌矿废水重金属对土壤-水稻的复合污染及生态影响评价. 农业环境科学学报, 2003, **22**(4):385~390.

[21] 汤惠华, 林海英, 杨默丽. 味精废液在水稻上施用效果. 福建农业科技, 1994, **5**:32.

[22] 张铭光, 黄群声. 味精生产排出的废液对白菜生长的影响. 华南师范大学学报(自然科学版), 2000, **3**:81~84.