谷氨酸 N,N－二乙酸及液体肥联合强化对东南景天修复重金属污染土壤的影响

陈亦铎，曾非凡，林贤柯，梁源芳，陈杨梅，邓兰生，吴启堂，卫泽斌

（华南农业大学资源环境学院，广州 510642）

摘要：化学强化可提高超富集植物对土壤重金属的提取效果。采用盆栽试验，研究了可生物降解螯合剂谷氨酸 N,N－二乙酸（GLDA）、液体肥的不同用量及复配使用对超富集植物东南景天吸收土壤重金属 Cd、Zn 的影响，并探讨了其渗滤液对环境的风险。结果表明：单一使用 GLDA 或者液体肥均能提高东南景天对土壤 Cd、Zn 的提取效率，其中 1.25 mmol/kg GLDA 处理的 Cd、Zn 提取量分别是空白处理的 1.36，1.46 倍，0.5 g/kg 液体肥处理的 Cd、Zn 提取量分别是空白处理的 1.40，1.43 倍，这 2 种低用量单独使用的处理对 Cd 提取效率最高，达到 41%～42%，且对应的渗滤液重金属含量均比空白处理要低，其环境风险较小。GLDA 与较高用量（2 g/kg 土）液体肥复配时，其东南景天对土壤 Cd、Zn 的提取量与空白处理相比有所下降。结果表明，GLDA 和液体肥在强化植物修复方面有明显潜力，而且以低剂量单独使用强化效果较佳，值得进一步的田间试验核实。

关键词：植物提取；GLDA；液体肥；东南景天；重金属

中图分类号：X53；X173　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2021)03-0378-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.051

Effects of L-glutamic Acid N，N－diacetic Acid（GLDA）and Liquid Fertilizer on Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils by *Sedum alfredii*

CHEN Yiduo，ZENG Feifan，LIN Xianke，LIANG Yuanfang，

CHEN Yangmei，DENG Lansheng，WU Qitang，WEI Zebin

（*College of Natural Resources and Environment*，*South China Agricultural University*，*Guangzhou* 510642）

Abstract：Chemical enhancement can improve the heavy metal phytoextraction efficiency of hyperaccumulator from soil. A pot experiment was conducted to study the effects of different dosage and combinations of biodegradable chelating agents L-glutamic acid N，N-diacetic acid（GLDA）and liquid fertilizer on the absorption of Cd and Zn by hyperaccumulator *Sedum alfredi*，and evaluate the environmental risk of their leachate. The results showed that the single use of GLDA or liquid fertilizer both increased the extraction efficiency of Cd and Zn of *Sedum alfredii*. The phytoextraction of Cd and Zn in the treatment with 1.25 mmol/kg GLDA was 1.36 and 1.46 times as much as that of the control，respectively，and the treatment with 0.5 g/kg liquid fertilizer also increased phytoextraction of Cd and Zn by 1.40 and 1.43 times，respectively. The treatment with low dose of GLDA or liquid fertilizer resulted in highest Cd phytoextraction efficiency，which reached 41% to 42%. The concentration of heavy metal in the corresponding leachates of these two treatments were also lower than that of the control，indicating lower environmental risk. When the high dose of liquid fertilizer（2 g/kg）was combined with GLDA，the phytoextraction of Cd and Zn by S. *alfredii* was lower than that of the control. These results indicated that GLDA and liquid fertilizer had potential to enhance phytoremediation of S. *alfredii*，and it was better to use these two reagents separately and in low dosage. These preliminary conclusion needs further verification with field experiments.

Keywords：phytoextraction；GLDA；liquid fertilizer；*Sedum alfredii*；heavy metal

收稿日期：2020-10-26

资助项目：广东特支项目本土创新团队项目（2019BT02L218）；广东省科技计划项目（2018B030324003）

第一作者：陈亦铎（1995—），男，在读硕士研究生，主要从事土壤重金属治理与修复技术研究。E-mail：chenyiduo1995@126.com

通信作者：卫泽斌（1980—），男，博士，副教授，主要从事土壤环境污染研究。E-mail：wezebin@scau.edu.cn

工业的快速发展引发了日益严重的土壤重金属污染,威胁着人体健康以及环境安全。土壤重金属的修复技术有很多种,包括植物修复技术、固化/稳定化技术、淋洗技术、电化学技术等[1],其中植物修复技术因为其价格低廉、环境友好的特点,是最有前途的修复技术之一。螯合剂能使土壤重金属从不溶态转变为可溶态,一部分螯合剂还可以通过促进植物生长来提高植物对土壤重金属修复效率[2]。在种植作物的过程中添加含有特殊化学物质的肥料,也可以用来处理土壤中的重金属[3-4]。

乙二胺四乙酸(EDTA)是一种人工螯合剂,对重金属有着较强的络合能力,但生物降解性差,其淋出液具有污染地下水的风险[5]。谷氨酸 N,N—二乙酸(GLDA)是一种由植物原料制成可生物降解螯合剂,受到广泛关注[6]。已有研究[7-8]表明,GLDA 可以活化土壤中的重金属离子,增加其生物有效性,还可以促进植物对重金属的吸收以及重金属向植物地上部运转的能力,目前已经有 GLDA 用于污染土壤淋洗的相关报道[9-11]。GLDA 溶于水后 pH>7,适当降低其 pH,可以增加土壤重金属的活性,提高其对土壤重金属的去除率[10,12]。施肥可以提高土壤肥力,促进重金属超富集植物生长,提高生物量,进一步提高提取效率[13]。随肥施加螯合剂,可降低螯合剂的施用量,降低成本。本研究拟将液体肥与 GLDA 混合使用后,研究其是否能在促进东南景天生长的同时增加东南景天对土壤中重金属提取量,并降低对环境的污染风险,以期为植物修复效率的提高提供强化措施和科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试土壤:采自广东省清远市龙塘某污染农田,pH 为 5.26,有机质含量为 29.4 mg/kg,CEC 为 22.1 cmol(+)/kg,Cu 含量为 120.547 mg/kg,Zn 含量为 230.856 mg/kg,Pb 含量为 111.723 mg/kg,Cd 含量为 1.648 mg/kg。

供试试剂:可生物降解螯合剂 GLDA(谷氨酸,N,N—乙酰乙酸四钠,GLDA—Na 4,47%水溶液,产品名—Dissovline © GL—47,购自阿克苏诺贝尔)、EDTA(乙二胺四乙酸二钠,分析纯)、液体肥(乡喜旺苗,购自东莞一翔复合肥料有限公司),液体肥含水率为 15%,氮含量为 200 g/L,磷含量为 130 g/L,钾含量为 170 g/L,有机质含量为 30 g/L。

供试植物:东南景天,取自浙江衡州古老铅锌矿山,Zn/Cd 超富集植物,选择大小均匀枝条扦插。

1.2　试验设计

采用盆栽试验,土壤风干后过 4 mm 筛,每盆装土 2 kg,盆底设置塑料小盆,每盆种植 3 棵东南景天。试验设计见表 1,共 11 个处理,每个处理 3 次重复。

表 1　试验设计

处理组	处理方式
CK	无
F1	施加液体肥 0.5 g/kg 土
F2	施加液体肥 1 g/kg 土
F3	施加液体肥 2 g/kg 土
GF1	施加 GLDA 1.25 mmol/kg 土+液体肥 2 g/kg 土
GF2	施加 GLDA 2.5 mmol/kg 土+液体肥 2 g/kg 土
GF3	施加 GLDA 5 mmol/kg 土+液体肥 2 g/kg 土
G1	施加 GLDA 1.25 mmol/kg 土
G2	施加 GLDA 2.5 mmol/kg 土
G3	施加 GLDA 5 mmol/kg 土
EDTA	施加 EDTA 2.5 mmol/kg 土+液体肥 2 g/kg 土

试验于 2017 年 1 月 11 日将生物量接近的景天幼苗扦插于重金属污染土壤中,采用尿素和 KH_2PO_4(均为分析纯)作基肥与土壤混匀,用量分别为:氮 100 mg/kg,磷 80 mg/kg,钾 100 mg/kg,培养 4 个月,土壤保持湿润状态。于 2017 年 5 月 8 日分别将 1 g(0.5 g/kg)、2 g(1 g/kg)、4 g(2 g/kg)液体肥及 1.669 g(1.25 mmol/kg)、3.338 g(2.5 mmol/kg)、3.511 g(5 mmol/kg)GLDA 溶于 400 mL 水中,小心浇灌到土壤表面,每个盆栽底下放置塑料小盆用于收集渗滤液。于 5 月 16 日和 5 月 25 日分别收集渗滤液。于 5 月 25 日采集东南景天。

1.3　样品的采集与分析

用剪刀剪取东南景天地上部,称得地上部质量即为每盆东南景天产量。东南景天收获后用自来水冲净,再用双蒸水洗净,晾干,置于信封袋中,于 45 ℃烘箱中烘干,粉碎,贮存于封口袋中待测;于塑料小盆中收集渗滤液,过滤,贮存于塑料瓶内冷藏待测。

将盆栽中的土壤倒入塑料盆中,混匀,用四分法收集约 500 g 土壤,风干,用研钵研磨后过筛保存于密封袋中。土壤基本理化性质按照《土壤农业化学分析方法》[14]进行;土壤重金属全量使用 HNO_3/HCl/HF 微波消解;植物重金属全量使用 HNO_3/H_2O_2 微波消解;渗滤液重金属全量使用 HNO_3 消解;用火焰原子分光光度计(Hitachi Z2300)及石墨炉原子吸收光谱仪(Hitachi Z2700)测定重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 含量。

1.4　数据分析方法

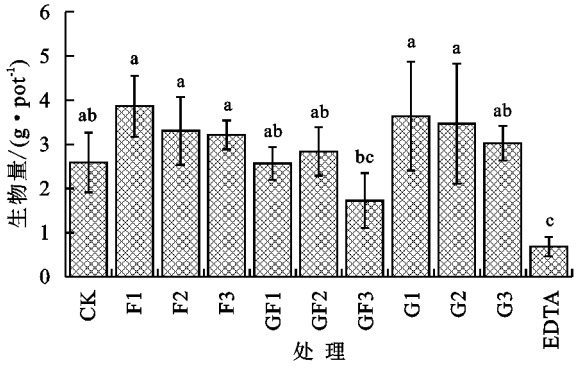
所有数据用 Excel 2016 软件处理,图像由 Origin 2019 软件绘制,多重比较(Duncan)由 SPSS 25.0 数据统计软件完成。土壤重金属提取率计算公式为:

$$\text{土壤重金属提取率}(\%)=\frac{\text{植物吸收重金属总量}}{\text{土壤重金属总量}}\times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 不同处理对东南景天生物量的影响

从图 1 可以看出，和 CK 相比，只施加了液体肥或 GLDA 的东南景天生物量均有提高，但是并没有显著性差异。随着液体肥及 GLDA 施加量的提高，东南景天生物量呈现下降的趋势。可以认为，液体肥及 GLDA 均有效促进了东南景天的生长，但是当 GLDA 用量超过 2.5 mmol/kg 或液体肥用量超过 1 g/kg 之后，对景天生长的促进效果越来越不明显。GLDA 与液体肥混合处理对东南景天没有明显的促生长效果，GF3 处理的东南景天生物量显著低于 F1、F2、F3、G1、G2 处理的东南景天生物量。EDTA 与液体肥混合处理的生物量明显低于 CK。



注：图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同处理东南景天的生物量

2.2 不同处理对东南景天重金属含量的影响

由表 2 可知，和 CK 相比，液体肥处理的东南景天中 Cd、Zn 含量均有所下降，有可能是液体肥中的磷降低了土壤重金属的活性[15]，其中 F3 处理的南景天 Cd、Zn 含量下降得最多。施加 GLDA，提高了东南景天 Cd、Zn 含量，其中 G3 处理的东南景天 Cd、Zn 含量最高。GLDA 与液体肥混合处理也提高了东南景天的 Cd、Zn 含量，其中 GF3 处理的东南景天 Cd、Zn 含量在混合处理中最高。EDTA 处理的 Cd 含量低于 CK，Zn 含量显著高于 CK。可以发现，高剂量的 GLDA 可以大幅度增强土壤的重金属活性，增加其生物有效性，使植物体内重金属含量上升。

2.3 不同处理对东南景天提取重金属的影响

东南景天对重金属的提取量用地上部生物量与重金属含量乘积来表示，由表 3 可知，液体肥处理的东南景天对 Cd、Zn 的提取量均高于 CK，表现为0.5 g/kg 液体肥处理＞1 g/kg 液体肥处理＞2 g/kg 液体肥处理＞空白处理。GLDA 单独处理的东南景天重金属 Cd、Zn 提取量表现为 1.25 mmol/kg GLDA 处理＞5 mmol/kg GLDA 处理＞2.5 mmol/kg GLDA 处理＞空白处理。0.5 g/kg 液体肥和 1.25 mmol/kg GLDA 处理的东南景天 Cd 提取率达到 41%～42%，是所有处理中最高的。GLDA 与液体肥混合处理的东南景天，只有 2.5 mmol/kg GLDA 及液体肥混合处理的 Cd提取量大于空白处理，只有 5 mmol/kg GLDA 及液体肥混合处理的 Zn 提取量少于空白处理。但是 GLDA、液体肥单独处理以及混合处理与空白处理比较，东南景天 Cd、Zn 提取量均没有显著性差异。EDTA 处理的东南景天重金属 Cd、Zn 提取量则显著低于空白处理，EDTA 淋洗抑制了东南景天的生长。综合考虑东南景天地上部的生物量、重金属 Cd、Zn 含量及提取量，使用 0.5 g/kg 液体肥或者 1.25 mmol/kg GLDA 的用量效果最佳。植物的生物量随着 GLDA 的用量上升呈现先上升再下降的趋势，这与之前的研究[9,16-17]相吻合，可以表明，高浓度的 GLDA 会抑制植物的生长[18]。而王正等[19]的研究结果表明，单次高剂量的 GLDA 施加会对植物生长造成抑制作用，而将高剂量的 GLDA 分多次施加能显著增加植物的生物量。本研究表明，高剂量的液体肥对东南景天生长起抑制作用，以后的研究应降低液体肥的使用量，因为低剂量的液体肥可以显著增加东南景天的生物量，且对东南景天 Cd、Zn 含量的影响不明显。液体肥与 GLDA 混合使用对植物进行处理时应该考虑将单次施加的剂量改成多次施加，这样可以很好地避免一次浓度过高对植物造成的毒害作用。

表 2 不同处理东南景天的重金属含量

单位：mg/kg

处理	Cd	Zn
CK	382.9±29.1ab	11072±1641bc
F1	360.9±5.9ab	10805±487bc
F2	376.7±71.2ab	10649±631bc
F3	337.1±70.1b	9415±700c
GF1	386.6±30.5ab	11513±679bc
GF2	380.0±46.9ab	11273±1066bc
GF3	432.5±45.9ab	13312±86ab
G1	373.3±31.8ab	11674±320bc
G2	366.4±41.3ab	11036±2024bc
G3	448.9±62.3a	13592±1543ab
EDTA	339.7±79.8b	14482±3881a

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4 不同处理对土壤 pH 及重金属含量的影响

由表 4 可知，与 CK 相比，单独施加液体肥后土壤 pH 下降了，但是并没有显著性差异。GLDA 单独处理中，土壤 pH 随着 GLDA 的用量上升而上升，表现为 G1＜G2＜G3，但是并没有显著性差异，而 G3 处理的 pH 与除 G1、G2 处理之外的其他处理均存在显著性差异。GLDA 与液体肥混合处理中，随着 GLDA 用量的上升，土壤 pH 也上升，表现为 GF1＜GF2＜GF3。

表 3　不同处理东南景天的重金属提取量及提取率

处理	Cd/(mg·pot^{-1})	Zn/(mg·pot^{-1})	Cd 提取率/%	Zn 提取率/%
CK	0.9977±0.3070ab	29.33±11.38ab	30.27	6.35
F1	1.3945±0.2524a	41.89±8.67a	42.31	9.07
F2	1.2100±0.0787ab	34.97±6.71ab	36.71	7.57
F3	1.0682±0.1228ab	30.11±1.07ab	32.41	6.52
GF1	0.9957±0.1792ab	29.67±5.25ab	30.21	6.43
GF2	1.0818±0.2567ab	31.96±6.40ab	32.82	6.92
GF3	0.7628±0.3427b	23.08±8.65bc	23.14	5.00
G1	1.3598±0.4999a	42.80±15.44a	41.26	9.27
G2	1.2359±0.3364ab	37.11±9.67ab	37.50	8.04
G3	1.3528±0.1995a	40.81±2.79a	41.04	8.84
EDTA	0.2380±0.1193c	10.30±4.80c	7.22	2.23

由表 4 可知,与 CK 相比,F1、F2、F3 处理的土壤 Cd 含量均有下降,下降量最多的是 F1 处理,但并无显著性差异。EDTA 处理的土壤 Cd 含量也比 CK 处理高。可以看出,生物量较低的处理,土壤 Cd 含量比 CK 的高。各处理的土壤 Zn 含量均无明显差异。CK 与 F1、F2、F3 处理之间的土壤 Cu 含量无明显差异,在 GLDA 单独处理中土壤 Cu 含量表现出随着 GLDA 用量的上升而减少的趋势,表现为 G1>G2>G3,同样的情况出现在 GLDA 与液体肥混合处理上,表现出 GF1>GF2>GF3,而 G3、GF3、EDTA 处理的土壤 Cu 含量明显少于 CK($P<0.05$)。GLDA 单独处理和 GLDA 与液体肥混合处理的土壤 Pb 含量均表现出随着 GLDA 用量的上升,土壤 Pb 含量下降的趋势,但并没有明显差异。

表 4　不同处理土壤的 pH 和重金属全量

处理	pH	Cd/(mg·kg^{-1})	Zn/(mg·kg^{-1})	Cu/(mg·kg^{-1})	Pb/(mg·kg^{-1})
CK	5.13±0.10a	1.07±0.33a	228±19a	140±2de	133±4ab
F1	4.87±0.05a	0.74±0.27a	211±2a	140±2de	136±6ab
F2	4.56±0.11a	0.73±0.16a	231±2a	143±4e	136±3ab
F3	4.64±0.18a	0.99±0.11a	242±11a	138±4de	134±5ab
GF1	4.66±0.09a	1.30±0.62a	247±9a	130±1f	134±0ab
GF2	4.85±0.33a	1.15±0.28a	240±12a	129±2bcd	127±4ab
GF3	5.14±0.07a	1.27±0.12a	219±19a	115±7a	117±9ab
G1	5.24±0.26ab	1.03±0.32a	233±15a	143±8e	133±2a
G2	5.57±0.32ab	1.16±0.27a	241±18a	134±8cde	130±5ab
G3	6.21±0.12b	1.18±0.15a	221±7a	121±9ab	126±4ab
EDTA	5.04±0.09a	1.30±0.12a	231±13a	126±8abc	115±2b

2.5　不同处理的渗滤液的 pH、重金属含量及总量

由表 5 可知,第 1 次收集的渗滤液 pH 普遍偏低,其中液体肥处理渗滤液 pH 小于 CK,可以认为是液体肥中的营养物质使渗滤液 pH 降低。而 GLDA 单独处理和 GLDA 与液体肥混合处理则表现出随着 GLDA 用量的上升,渗滤液 pH 也上升的趋势,其中 GF3、G1、G2、G3、EDTA 处理符合 IV 类地下水标准[20]和农田灌溉水质量标准[21],其他处理均不符合农田灌溉水质量标准,并且超出 IV 类地下水标准。第 2 次收集的渗滤液 pH 与第 1 次相比有所上升,除了 F2、F3、EDTA 处理之外的其他处理都符合 I 类地下水标准和农田灌溉水质量标准。F2、F3、EDTA 处理符合 IV 类地下水标准和农田灌溉水质量标准。

表 5　不同处理渗滤液的 pH

处理	2017 年 5 月 16 日	2017 年 5 月 25 日
CK	5.38±0.01a	6.72±0.37a
F1	5.18±0.04a	6.93±0.18a
F2	5.24±0.06a	6.47±0.07a
F3	5.16±0.13a	5.81±0.85a
GF1	5.15±0.25a	6.53±0.05a
GF2	5.47±0.08a	6.66±0.39a
GF3	5.84±0.38a	6.67±0.39a
G1	5.84±0.27a	7.25±0.29a
G2	5.85±0.17a	7.10±0.22a
G3	6.06±0.21a	6.86±0.12a
EDTA	5.94±0.24a	6.49±0.19a

不同处理的渗滤液淋出的重金属总量见表 6,2 次收集的渗滤液体积均为 1 L。收集的渗滤液 Cd 总量均无显著性差异,淋出的 Cd 总量随着液体肥或者 GLDA 用量的上升呈现上升的趋势,除 EDTA 处理之外,GF3 处理淋出的 Cd 总量最多。淋出的 Zn 总量无显著性差异,其他处理均比 CK 高。液体肥处理与 CK 相比,渗滤液 Cu 总量有轻微上升,没有显著性差异;有 GLDA 参与的处理,随着 GLDA 用量的上升,Cu 总量也上升,且 GF3、G3 处理显著高于 CK 的渗滤液 Cu 总量。EDTA 处理的渗滤液 Pb 总量显著高于其他处理;随着液体肥或者 GLDA 的用量的上升,渗滤液 Pb 也上升,但是液体肥对 Pb 远不如 GLDA 的影响大,G3 处理的渗滤液 Pb 总量明显高于除 EDTA、GF3 处理之外的其他处理。

表 6　不同处理渗滤液的重金属总量

单位:mg/pot

处理	Cd	Zn	Cu	Pb
CK	0.035±0.007a	1.310±0.382a	0.088±0.009a	0.018±0.008a
F1	0.040±0.004a	1.515±0.093a	0.136±0.012ab	0.028±0.005a
F2	0.059±0.008a	1.979±0.136a	0.191±0.076ab	0.031±0.005ab
F3	0.111±0.079a	4.028±2.878a	0.257±0.044ab	0.058±0.008ab
GF1	0.072±0.004a	2.981±0.144a	1.731±0.918ab	0.079±0.030ab
GF2	0.080±0.028a	3.780±0.936a	4.802±1.082ab	0.184±0.069ab
GF3	0.165±0.087a	9.505±4.543a	15.348±4.988b	0.993±0.803ab
G1	0.025±0.020a	1.217±0.714a	2.365±0.438ab	0.058±0.029ab
G2	0.038±0.007a	2.205±0.207a	6.490±2.676ab	0.138±0.061ab
G3	0.068±0.007a	4.781±0.589a	16.880±1.754b	0.917±0.231ab
EDTA	0.190±0.012a	7.054±0.549a	6.932±0.651ab	2.090±0.181b

综合来看,渗滤液 Cu、Pb、Zn 总量与 GLDA 用

量成正相关关系；渗滤液 Cd、Zn 总量与液体肥用量成正相关关系，因此，要降低渗滤液的重金属总量，应该尽可能地降低 GLDA 及液体肥的用量。

不同处理渗滤液的重金属含量见表 7，第 1 次(2017 年 5 月 16 日)收集的渗滤液中所有处理的 Cd 含量均超过 IV 类地下水标准和不符合农田灌溉水质标准，产生的地下水污染风险较大，GF2、GF3、G3、EDTA 处理的 Zn 含量也不符合农田灌溉水质标准。液体肥单独处理的 Cu 含量均达标，与 GLDA 处理相关的 Cu 含量均不符合农田灌溉水质标准。GF2、GF3、G2、G3、EDTA 处理的 Pb 含量不符合农田灌溉水质标准且均超过 IV 类地下水标准。第 1 次的渗滤液 Cd、Zn 含量均无显著性差异；G3、GF3 处理的 Cu 含量显著高于 CK；EDTA 处理的 Pb 含量显著高于 CK。

第 2 次(2017 年 5 月 25 日)收集的渗滤液与第 1 次相比重金属含量均有所降低，F1、G1 处理的 Cd 含量符合 IV 类地下水标准，但是并不符合农田灌溉水质量标准，和其他处理相比 F1、G1 处理的污染风险相对降低。其他处理的 Cd 含量依旧超过 IV 类地下水标准。第 2 次的渗滤液 Cd、Zn 含量和第 1 次一样，没有显著性差异；G3 处理的 Cu 含量显著高于 CK、F1 处理；EDTA 处理的 Pb 含量显著高于 CK。

可以看出，产生的渗滤液初期重金属浓度较高，应该依靠收集或者稀释的方式降低其环境风险，也可以使用化学沉淀或者氧化还原等方法去除渗滤液中的重金属[22-23]。已有研究[24]表明，有机类淋洗剂对表层土壤产生的渗滤液容易被下层红壤所吸收，环境风险较小，之后渗滤液重金属浓度逐步下降，环境风险逐渐下降。而 G1、F1 处理更快的达到 IV 类地下水标准，相对其他处理环境风险更低。

表 7 不同处理渗滤液的重金属含量 单位：mg/L

采集日期	处理	Cd	Zn	Cu	Pb
2017 年 5 月 16 日	CK	0.024±0.002a	0.976±0.168a	0.050±0.002a	0.009±0.008a
	F1	0.030±0.002a	1.313±0.056a	0.099±0.002ab	0.017±0.000ab
	F2	0.030±0.008a	1.075±0.009a	0.134±0.077ab	0.020±0.009ab
	F3	0.051±0.036a	1.708±1.155a	0.163±0.037ab	0.030±0.005ab
	GF1	0.040±0.001a	1.696±0.127a	1.423±0.832ab	0.062±0.032ab
	GF2	0.047±0.017a	2.341±0.518a	3.844±0.931ab	0.159±0.065ab
	GF3	0.132±0.098a	7.663±5.061a	12.561±6.191b	0.936±0.803ab
	G1	0.017±0.013a	0.976±0.496a	1.919±0.133ab	0.049±0.035ab
	G2	0.025±0.001a	1.608±0.079a	4.805±2.302ab	0.105±0.056ab
	G3	0.053±0.008a	3.929±0.700a	12.601±1.197b	0.822±0.262ab
	EDTA	0.142±0.007a	5.107±0.279a	5.588±0.987ab	1.877±0.158b
2017 年 5 月 25 日	CK	0.012±0.007a	0.334±0.255a	0.038±0.009a	0.009±0.000a
	F1	0.009±0.002a	0.202±0.063a	0.037±0.010a	0.011±0.005ab
	F2	0.029±0.001a	0.904±0.068a	0.057±0.002ab	0.011±0.005ab
	F3	0.060±0.043a	2.321±1.739a	0.093±0.043ab	0.028±0.012ab
	GF1	0.032±0.004a	1.286±0.125a	0.308±0.091ab	0.017±0.008ab
	GF2	0.033±0.014a	0.958±0.646a	0.958±0.268ab	0.025±0.008ab
	GF3	0.033±0.011a	1.842±0.595a	2.788±1.692ab	0.057±0.016ab
	G1	0.008±0.007a	0.241±0.245a	0.446±0.318ab	0.009±0.008ab
	G2	0.013±0.006a	0.597±0.248a	1.685±0.380ab	0.033±0.008ab
	G3	0.015±0.002a	0.852±0.154a	4.279±2.697b	0.094±0.032ab
	EDTA	0.048±0.020a	1.946±0.824a	1.344±0.593ab	0.213±0.096b
GB/T 14848－2017－I 类[20]		≤0.0001	≤0.05	≤0.01	≤0.005
GB/T 14848－2017－IV 类[20]		≤0.01	≤5.00	≤1.50	≤0.10
GB 5084－2005[21]		≤0.01	≤2.00	≤1.00	≤0.20

3 结 论

(1)施加 0.5 g/kg 土的液体肥或 1.25 mmol/kg 土的 GLDA 可以促进东南景天的生长，促进东南景天的重金属 Cd、Zn 提取量，其对土壤 Cd 的提取率可达到 41%～42%。且产生的渗滤液重金属浓度较低，风险小，值得进一步进行田间试验论证核实。

(2) GLDA 与较高用量(2 g/kg 土)液体肥联合

使用,未能提高东南景天对土壤重金属的提取效率,后续需要进一步研究。

参考文献:

[1] 陈亚奎,卢滇楠.重金属污染土壤生物修复技术研究进展与现状[C]//中国环境科学学会.中国环境科学学会2019年学术年会论文集.西安:中国环境科学学会,2019:2952-2956.

[2] 贺玉龙,余江,谢世前,等.可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤[J].环境科学,2020,41(2):979-985.

[3] 卢维宏,张乃明,苏友波,等.联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2217-2226.

[4] 倪幸,李雅倩,白珊,等.活化剂联合柳树对重金属Cd污染土壤的修复效果研究[J].水土保持学报,2019,33(3):365-371.

[5] Luo C L, Shen Z G, Li X D, et al. Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS [J].Chemosphere,2006,63(10):1773-1784.

[6] Itrich N R, Mc Donough K M, van Ginkel C G, et al. Widespread microbial adaptation tol-Glutamate-N,N-diacetate (L-GLDA) following its market introduction in a consumer cleaning product [J]. Environmental Science and Technology,2015,49(22):13314-13321.

[7] Guo X F, Zhang G X, Wei Z B, et al. Mixed chelators of EDTA, GLDA, and citric acid as washing agent effectively remove Cd, Zn, Pb, and Cu from soils [J]. Journal of Soils and Sediments,2018,18(3):835-844.

[8] 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,等.可生物降解螯合剂GLDA诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J].环境科学,2015,36(5):1864-1869.

[9] 覃建军,唐盛爽,蒋凯,等.螯合剂GLDA对象草修复镉污染农田的影响[J].环境科学,2020,41(8):3862-3869.

[10] 郭晓方,韩玮,赵国慧,等.混合淋洗剂对污染土壤中重金属的去除及植物生长的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(7):1486-1493.

[11] 周宽,皇甫卓曦,钟承韡,等.可生物降解螯合剂GLDA诱导葎草修复镉污染土壤[EB/OL].[2021-4-7].环境科学,https://kns.cnki.net/kems/detail/11.2097.x.20200724.1817.008.html.

[12] Begum Z A, Rahman I M M, Tate Y, et al. Remediation of toxic metal contaminated soil by washing with biodegradable aminopolycarboxylate chelants [J]. Chemosphere,2012,87(10):1161-1170.

[13] Gerhardt K E, Gerwing P D, Greenberg B M. Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice [J]. Plant Science (Limerick),2017,256:170-185.

[14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:12-508.

[15] 向言词,官春云,黄璜,等.在铀尾渣污染土壤中添加磷对植物生长及重金属积累的影响[J].作物学报,2010,36(1):154-162.

[16] 邱亚群,李益华,彭佩钦,等.螯合剂添加对蜈蚣草修复砷污染土壤效果分析[EB/OL].环境工程[2021-4-7].https://kns.cnki.net/kems/detail/11.2097.x.20200610.1419.008.html.

[17] 袁江,李晔,许剑臣,等.可生物降解螯合剂GLDA和植物激素共同诱导植物修复重金属污染土壤研究[J].武汉理工大学学报,2016,38(2):82-86.

[18] 刘利,郝小花,田连福,等.植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J].生命科学研究,2015,19(2):176-184.

[19] 王正,孙兆军,Sameh Mohamed,等.胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果[J].环境科学,2020,41(12):5589-5599.

[20] 全国国土资源标准化技术委员会.GB/T 14848—2017,地下水质量标准[S].北京:中国标准出版社,2017:2-3.

[21] 中华人民共和国农业部.GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S].北京:中国标准出版社,2005:2-4.

[22] 曹海峰.络合态重金属废水处理技术研究进展[J].工业水处理,2015,35(11):14-17,91.

[23] 杨世迎,薛艺超,王满倩.络合态重金属废水处理:基于高级氧化技术的解络合机制[J].化学进展,2019,31(8):129-140.

[24] Guo X F, Wei Z B, Penn C J, et al. Effect of soil washing and liming on bioavailability of heavy metals in acid contaminated soil [J].Soil Science Society of America Journal, 2013,77(2):432-441.