

螯合剂和泥炭对苕麻吸收土壤镉的影响

沈莉萍¹, 宗良纲^{1*}, 蒋培¹, 刘卫星¹, 姜博¹, 陈亚华²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

摘要:通过生物盆栽试验研究了施用螯合剂(EDTA、柠檬酸)与泥炭对强化苕麻修复重金属镉污染土壤的作用。结果表明,施加泥炭能改善土壤的理化性质,增加苕麻的生物产量,泥炭单施、螯合剂(EDTA、柠檬酸)和泥炭的组合措施的相对产量分别为 1.23、1.13 和 1.41,因此泥炭和柠檬酸配施处理更有利于植物生长。就植物吸收镉能力来说,螯合剂(EDTA、柠檬酸)和泥炭的配施处理能更好地促进苕麻对镉的吸收,其土壤交换态镉所占镉形态质量分数为 61.6% 和 58.3%,具有强化植物修复的效果。螯合剂(EDTA、柠檬酸)和泥炭 2 种组合方式的地上部富集系数分别为 1.33 和 1.32,大于单施(EDTA、柠檬酸和泥炭)处理 1.11、1.11 和 1.05,具有较好的富集效应,同时螯合剂(EDTA、柠檬酸)和泥炭的组合处理对土壤镉的净化率分别达到了 1.13% 和 1.22%,而柠檬酸和泥炭配施具有较大的生物量,使植株总镉量略高于 EDTA 与泥炭的组合处理,因而更有利于镉污染土壤的修复。因此,利用螯合剂和泥炭的组合修复措施对强化苕麻修复镉污染土壤能取得更佳的效果。

关键词:螯合剂; 泥炭; 镉; 植物修复; 苕麻

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2767-06

Extraction of Cd by Ramie from Soils as Affected by Applications of Chelators and Peat

SHEN Li-ping¹, ZONG Liang-gang¹, JIANG Pei¹, LIU Wei-xing¹, JIANG Bo¹, CHEN Ya-hua²

(1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Life Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Pot experiments were performed to study the effectiveness of chelators (EDTA, citric acid) and peat in enhancing phytoextraction of heavy metal Cd by ramie. The results showed that peat increased the ramie's biomass by improving soil's physical and chemical properties, and the relative yields of peat alone, chelators (EDTA, citric acid) combined with peat were 1.23, 1.13 and 1.41 respectively. So the combination of citric acid and peat was more useful for growth of the ramie. As far as improving Cd uptake was concerned, it seemed that the combination of chelators with peat significantly promoted Cd uptake by the plant, and the percent of changeable Cd in soil were 61.6% and 58.3%. In addition, it had better bioaccumulation effects to combine with chelators and peat, of which Cd bioaccumulation coefficients were 1.33 and 1.32, compared to 1.11, 1.11 and 1.05 in application of peat, EDTA and citric acid respectively. What's more, cadmium removal rates in soil were up to 1.13% and 1.22% respectively in applications of two kinds of chelators (EDTA, citric acid) combined with peat. Therefore, it had better effects of phytoremediation to accumulate more cadmium amounts by combining with citric acid and peat because of more biomass. In conclusion, the phytoremediation by ramie can be more effective when chelators and peat were combined and added to soils.

Key words: chelators; peat; Cd; phytoremediation; ramie

土壤重金属污染是导致土壤环境质量下降的重要原因之一^[1],其中突出的问题是土壤镉污染严重^[2].镉是生物毒性很大的重金属元素之一,其迁移性很强,且极易被植物吸收并积累^[3].目前,土壤重金属污染的修复与控制是环境科学领域研究的热点.近 10 年来,植物修复作为污染土壤治理技术是一门正在崛起的多学科的边缘科学,并涉及土壤学、植物学、分子生物学和环境工程等^[4,5].然而,由于人们从野外筛选的超富集植物其生物量普遍较小,生长缓慢,且受气候、土壤等环境条件的限制,以致修复效率较低,制约着大规模的实际应用^[6].

土壤中施加螯合剂(如 EDTA、DTPA、EGTA 和柠檬酸等)能够活化土壤重金属,提高重金属的生物有

效性,促进植物吸收^[7],这种将螯合剂用于植物修复的螯合诱导修复技术(chelate-induced phytoextraction)^[8]已成为应用植物修复土壤重金属污染的一个新的发展方向.螯合诱导强化植物吸收金属的操纵机制还未充分了解,很可能是操纵强化吸收的主导机制.Romheld 等^[9]认为,金属螯合物可以从内皮层裂口处进入根内,然后被迅速地转移到茎叶.另一些学者用数据支持了这种假设^[10,11].但施加 EDTA 等螯合剂在活化土壤重金属的同时会增大

收稿日期: 2008-11-08; 修订日期: 2009-04-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA102404)

作者简介: 沈莉萍(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境质量与食品安全, E-mail: shenliping54@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: zonglg@njau.edu.cn

重金属污染地下水的潜在危险,改变 EDTA 在土壤中的降解周期、特性和最终降解产物等^[12].因此,人们一方面筛选对环境影响小的螯合剂,如壳聚糖、EDDS 等,另一方面降低螯合剂施用量,通过改变土壤 pH、Eh 或施用其他改良剂来配合螯合诱导修复,提高植物富集重金属效率,使螯合剂对环境的负面影响最小^[8].而目前利用螯合剂和有机物料组合方式来提高植物修复效率的研究还鲜见报道.

苕麻生物量大,生长周期短,1年可收割3次,而且适应性强,甚至能在 Cu、Cd 和 As 复合污染的土壤中生长期^[13].同时,王凯荣等^[14]研究指出:即使土壤 Cd 含量 $> 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,产出的麻纤维亦能满足加工中档麻织品的质量要求.因此,苕麻作为我国重要的经济作物,在实施生态农业与土壤资源安全利用方面可作为改种改制的首选作物,具有较好的经济效益.

表 1 供试土壤和泥炭基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil and peat

试验材料	pH 值	CEC / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态镉 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全镉 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
土壤	5.70	20.71	28.88	1.92	0.571	11.27	25.92	7.19	12.03
泥炭	6.00		90.00					未检出	未检出

本试验共设置 6 种不同处理:①对照(CK):仅施加基肥;②EDTA(E): $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;③柠檬酸(M): $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;④泥炭(N):5% 土重;⑤EDTA+ 泥炭(EN):EDTA $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 5% 泥炭混合;⑥柠檬酸+泥炭(MN):柠檬酸 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 5% 泥炭混合,其中⑤⑥为组合处理.各处理重复 3 次,EDTA 以包膜形式混入土壤中,柠檬酸则以溶液形式分次加入以提高效果.每盆装土 5kg,统一按 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ KH_2PO_4 和 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ K_2SO_4 施加基肥.

1.3 样品采集和分析测定

盆栽试验于 7 月下旬采集苕麻鲜叶,采用分光光度法测定苕麻叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量.在此时期苕麻生长茂盛,叶子宽大鲜绿,麻秆逐渐变粗,株高为 0.5~0.7 m 左右.8 月上旬~9 月上旬老叶开始泛黄脱落并伴随新叶生长,同时麻秆继续变粗,并有 1/3 黑秆,株高为 1 m 左右.期间分 2 次收集苕麻落叶,每次间隔半个月,分别烘干称重,粉碎后测定重金属含量.9 月中旬苕麻新叶生长茂盛,黑秆达 50% 进行破秆收获.分开收取苕麻根、麻骨、麻皮和麻叶 4 部分,按要求分别称重、烘干、粉碎.同时采集土壤样品,风干后磨碎,分别过 1 mm 和 0.149 mm 筛后备用.植株镉含量采用浓硝酸与高氯酸(硝酸

益.因此,本研究通过生物盆栽试验,探讨螯合剂和泥炭的不同组合修复技术对苕麻吸收土壤镉的作用,旨在为有效开展重金属污染土壤生物修复提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2007 年 6~9 月在南京农业大学网室进行.供试土壤来自苏南某地 Cd 污染的旱地土壤(0~20 cm),类型为黄棕壤,经风干后过 4 mm 筛,充分混匀后备用.供试苕麻(ramie)品种为湘苕三号,由南京市六合区苕麻生产基地提供.6 月中旬移栽,每盆分别定植大小接近的苕麻苗 2 株.供试土壤和泥炭的基本理化性质见表 1.

1.2 盆栽试验设计

高氯酸=5:1)湿法消解,用原子分光光度法(Varian 220 Spectr AA)测定镉含量.土壤全镉含量采用 $\text{HClO}_4\text{-HF-HNO}_3$ 三酸坩锅消煮,用原子分光光度法(Varian 220 Spectr AA)测定镉含量.土壤镉形态分级采用 Tessier 连续提取法^[15]测定.

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 和 SAS 软件(1989-1996 by SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)进行整理分析,使用统计软件 SPSS 软件(1989-1999 by SPSS Inc., Chicago, USA)对试验数据进行方差分析.

2 结果与讨论

2.1 不同修复措施对苕麻生物量和生理特性的影响

植物修复的效果取决于在污染土壤环境中植物生物量的大小.由表 2 看出,本试验的不同修复措施都能提高苕麻生物量,其中施加泥炭的处理效果较好.泥炭增加了土壤有机质含量,调节土壤 pH,改善土壤理化性质,促进植物生长^[16].柠檬酸与泥炭的组合处理好于 EDTA 处理,这可能与螯合剂本身的性质有关.EDTA 是人工合成的螯合剂,其本身可能具有植物毒性,从而抑制植物生长,使植株生物量变小.比较各处理的经济系数看出,柠檬酸和泥炭都较

好地提高麻皮的产量, 具有较好的经济效益, 而 EDTA 的效果并不显著. 因此, 从增加生物产量, 提

高经济效益方面考虑, 利用 EDTA 配合植物修复并非最佳选择.

表 2 不同修复措施对单苕麻生物量的影响¹⁾

Table 2 Effects of different applications on every ramie's biomass

处理	根干重/ $g \cdot plant^{-1}$	麻骨干重/ $g \cdot plant^{-1}$	麻皮干重/ $g \cdot plant^{-1}$	麻叶干重/ $g \cdot plant^{-1}$	总量干重/ $g \cdot plant^{-1}$	相对产量	经济系数 ^{2)/%}
CK	2.73±0.16 a A	1.95±0.07 a A	2.40±0.15 b A	17.32±0.39 d C	24.40±1.04 a A	1.00	9.82
E	3.14±0.06 b B	1.62±0.05 b B	2.87±0.11 a A	16.72±0.35 c C	24.34±0.89 a A	1.00	11.79
M	3.68±0.21 c C	2.75±0.21 d D	6.71±0.29 c B	12.00±0.59 a A	25.14±0.91 b A	1.03	26.67
N	5.40±0.18 d D	3.67±0.14 e E	8.04±0.12 d C	15.36±0.65 b B	30.01±1.25 d C	1.23	26.79
EN	3.77±0.07 c C	1.66±0.07 c C	3.35±0.23 a A	18.73±0.76 e D	27.50±1.11 c B	1.13	12.18
MN	6.62±0.26 e E	2.68±0.29 d D	6.82±0.18 c B	18.41±0.71 e D	34.52±1.27 e D	1.41	19.76

1) 表中同一列的不同小写字母为通过 0.05 显著性检验, 同一列的不同大写字母为通过 0.01 显著性检验, 下同; 2) 经济系数=麻皮干重/总量干重

植物修复时配合施加螯合剂和泥炭等措施, 不仅具有提高生物量的作用, 而且对植株生理特性也有一定的影响, 尤其是对苕麻叶绿素含量的影响. 叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素, 其含量的高低能够反映光合作用能力的强弱. 严重玲等^[7]认为叶绿素含量的减少是表征叶片衰老的重要指标. 施加泥炭的处理均明显提高了苕麻叶中叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量. 说明泥炭的加入有利于叶片叶绿

素的形成, 而类胡萝卜素则无明显的变化. 在王凯荣等^[14]的报道里指出, 苕麻叶绿素 a/b 的比值随土壤中镉浓度的变化有相关关系, 这说明植物叶绿素含量与植株吸收重金属含量具有一定的关系. 虽然 a/b 的值与表 3 植株叶片含镉量没有很好的相关性, 但是总的趋势具有一致性, 即组合措施高于单施处理, 这也反映了配施处理可以提高植株吸收镉的能力, 有利于污染土壤的植物修复.

表 3 不同修复措施对苕麻叶绿素含量的影响/ $mg \cdot g^{-1}$

Table 3 Effects of different applications on ramie's chlorophyll content/ $mg \cdot g^{-1}$

处理	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	类胡萝卜素含量	a/b ¹⁾
CK	1.302±0.011 a A	0.552±0.002 a A	0.205±0.003 a A	2.359
E	1.341±0.012 b B	0.591±0.001 b B	0.253±0.004 b B	2.268
M	1.330±0.014 b B	0.552±0.006 a A	0.241±0.001 b B	2.356
N	1.442±0.007 c C	0.618±0.006 c C	0.212±0.002 a A	2.327
EN	1.486±0.010 e E	0.623±0.004 c C	0.241±0.004 b B	2.385
MN	1.546±0.008 d D	0.654±0.004 d D	0.239±0.003 b B	2.364

1) a/b= 叶绿素 a 的含量/叶绿素 b 的含量

2.2 不同修复措施对苕麻吸收土壤中镉的影响

植物修复的效果往往还与其不同器官吸收和积累特性有关. 不同修复措施除了影响植物生长外, 其吸收特性也会因修复措施而异. 表 4 结果显示, 与对照 CK 相比, 各种修复处理都促进苕麻地上部对镉的积累, 降低根部的含镉量. 说明修复措施能够促进镉从根部向地上部转移, 其中 EDTA 处理效果最明显, 其 S/R> 1. 这也与梁彦秋等^[8]的有机酸修复镉污染土壤中 EDTA 的效果好于柠檬酸的研究结果一致. 而螯合剂与泥炭配施与单施相应的螯合剂相比其 S/R 值并无显著变化, 这主要因为泥炭的加入改善了土壤理化性质, 促进苕麻根系的生长, 因此能增加根系对镉的吸收. 同时泥炭能分解形成各种有机

酸、糖类、酚类及含氮、含硫的杂环化合物, 具有一定的活性基团, 很容易作为配体与重金属元素进行配合或螯合作用, 从而影响重金属的生物有效性^[6], 增加对镉的吸收. 因此, 泥炭与螯合剂配施处理的组合修复效果更好.

苕麻生长期较长, 生长过程中会产生生理落叶. 为了弄清各组合修复措施对不同生长时期苕麻叶吸收镉的影响, 在其生长过程中分 2 批收集了落叶样 (LY1、LY2) 以及苕麻收获时的鲜叶样 (XY), 并分别测定含镉量. 从图 1 中可以看出, 在苕麻生长时, 第一批落叶镉含量较高, 而在落叶之后的新叶则由于其生长期短, 其富集的镉也相对较少. 组合配施处理的叶片中镉含量高于单施处理, 其中 EDTA 处理的

含量最高,这与各部分镉含量结果相一致.因此,苧麻叶片的镉含量与生长期有关,生长期越长则叶中含镉量就越高.苧麻在成熟前期其叶片会大量脱落,

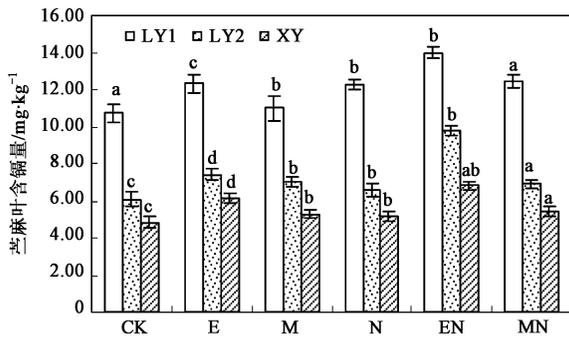
由于落叶中镉含量较高,所以在用苧麻修复镉污染土壤时,要注意其落叶的收集处理,以免影响修复效果.

表 4 不同修复措施下苧麻各部分镉含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Cd contents of different parts of ramie in different applications/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	根系 Cd 含量	麻骨 Cd 含量	麻皮 Cd 含量	麻叶 Cd 含量	地上部平均 Cd 含量	S/R ¹⁾
CK	17.08±0.30 d C	10.28±0.25 a A	12.69±0.27 a A	6.91±0.03 a A	10.07±0.47 a A	0.59
E	11.61±0.06 a A	12.17±0.29 c BC	17.81±0.12 d D	7.55±0.03 b A	12.55±0.23 d D	1.08
M	14.86±0.51 c B	12.08±0.17 c BC	16.84±0.43 c C	7.24±0.03 a A	12.05±0.38 c C	0.81
N	16.67±0.42 d C	11.19±0.42 b AB	15.19±0.35 b B	7.24±0.21 a A	11.10±0.21 b B	0.67
EN	14.03±0.06 b B	12.92±0.41 d C	20.39±0.47 f E	9.37±0.28 a B	14.22±0.20 f F	1.01
MN	15.00±0.44 c B	13.28±0.68 d C	18.39±0.35 e D	7.67±0.23 a A	13.07±0.31 e E	0.87

1) S/R= 地上部镉平均含量/根部镉平均含量



误差线表示标准差,不同小写字母为通过 0.05 显著性检验,下同

图 1 不同修复措施对同时期苧麻叶吸收镉的影响

Fig. 1 Extraction of Cd by ramie's leaves in different periods as affected by different applications

2.3 不同修复措施下土壤中镉形态的变化

土壤中重金属存在形态的改变必然影响其生物有效性,这也是修复效果因不同处理而异的原因.采用 Tessier 等^[5]的连续提取法将土壤重金属分成 5 个形态,即可交换态(EXC)、碳酸盐结合态(CA)、铁锰氧化物结合态(Fe-Mn)、有机结合态(OM)和残渣态(RES).由于供试土壤为酸性土壤,土壤中交换态镉约占 55%,铁锰氧化物结合态和碳酸盐结合态也有较高的比例.在镉的不同形态中,对环境具有潜在影响的镉^[19]约占总量的 78%,这说明土壤中镉活性较大,迁移能力强,容易被植物吸收.

图 2 所示,EDTA、柠檬酸与泥炭的配施效果好于单施处理,提高了土壤中可交换态镉的含量.这是由于土壤 pH、有机质等是影响土壤中镉形态的重要环境条件^[20].2 种螯合剂和泥炭组合配施处理的土壤 pH 分别降到 5.3 和 5.5,土水体系 pH 的降低,土壤中粘土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷降低,因而对重金属离子的吸附力减弱,导致溶液中

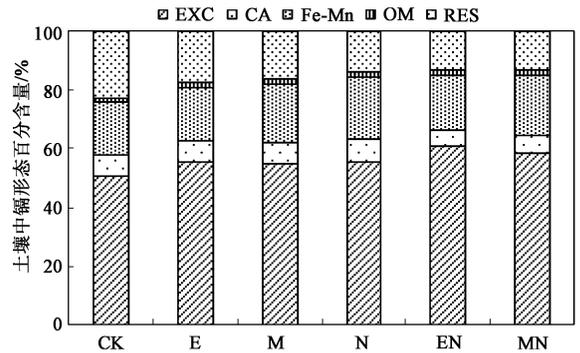


图 2 不同修复措施对土壤中镉形态的影响

Fig. 2 Effects of different applications on contents of five forms Cd in soil

重金属离子的浓度升高^[20].而有机质加入到土壤中后,对植物吸收重金属的影响是不同的.一般情况下,水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)^[22]可以与重金属形成可溶性配合物而抑制重金属的沉淀,但某些大分子的 DOM 尤其是一些含硫物质也可能与金属形成难溶性的配合物而促进重金属的沉淀^[21].

水溶性有机物是土壤和自然水体中一种重要的、很活跃的化学物质,能影响成土过程和土壤环境的酸碱特性,污染物质的溶解、吸附、解吸、迁移和生物毒性,微生物活性和营养物质的有效性等^[23~25].研究表明土壤 DOM 的浓度与土壤有机质含量呈正相关^[26].土壤 DOM 含有大量的功能基团,可以与土壤中的重金属通过络合和螯合作用形成有机-金属配合物,提高重金属的可溶性.实验证实,有机肥包括污泥、堆肥、秸秆、畜禽粪便等的分解或微生物分泌产生的 DOM 能减少土壤对重金属的吸附,提高活性及迁移性^[22,27],增加植物对重金属的吸收和积累.

提高污染土壤植物修复效率, 缩短修复周期^[28]. 在本试验中泥炭的有机质含量为 $90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并施入占土重 5% 的量, 因此土壤有机质含量较高, 使得水溶性有机物更易与重金属离子结合, 强化了植物修复的效果.

2.4 不同修复措施对污染土壤镉的净化率及镉富集能力的影响

评价一种修复措施的效果, 主要是看对土壤污染物的净化率. 从表 5 可以看出, 所有的修复措施均提高了植物中的总含镉量, 且配施处理均比单施效果好. 施入泥炭后植株地上部和根系的总含镉量均有提高. 同时, 2 种螯合剂和泥炭配施处理其土壤净

化率高于其他处理, 分别达到 1.13% 和 1.22%, 说明组合配施在修复镉污染土壤上具有较好的效果, 其结果与植株收获后的土壤镉含量有比较一致的变化趋势. 从地上部积累镉的质量分数来看, EDTA 的单施和配施处理都较其他处理更能提高地上部的镉含量, 说明 EDTA 具有更好的使重金属镉从根部向地上部转移的能力. 从地上部含镉绝对量来说, 柠檬酸与泥炭的配施处理则好于 EDTA 处理, 这主要由于柠檬酸与泥炭的组合措施有较大的生物量, 使得地上部镉的累积量略高于 EDTA, 土壤净化率略高于 EDTA 处理, 因而柠檬酸与泥炭的组合措施对土壤镉的净化效果较好.

表 5 不同修复措施下苕麻的镉累积量和对土壤的净化率

Table 5 Cd uptake and removal rate of soil by ramie in different applications

处理	植株收获后土壤 镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	植株总含镉量 / $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	地上部含镉量 / $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	根部含镉量 / $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	地上部吸收镉 的质量分数 %	土壤净化 率 ¹⁾ %
CK	11.412 ± 0.01 a A	529.80 ± 5.16 f D	436.40 ± 4.88 d C	93.38 ± 1.15 d D	82.37	0.73
E	11.097 ± 0.03 b B	605.06 ± 1.80 e C	532.22 ± 1.54 c B	72.84 ± 0.27 e E	87.96	0.89
M	11.344 ± 0.02 c C	626.82 ± 5.38 d C	517.34 ± 6.22 c B	109.48 ± 2.16 c C	82.53	0.86
N	10.659 ± 0.03 d D	726.32 ± 9.92 e B	546.32 ± 8.36 e B	180.00 ± 1.25 b B	75.21	0.91
EN	10.554 ± 0.02 e E	780.94 ± 2.98 b B	675.16 ± 2.93 b A	105.76 ± 1.12 c C	86.45	1.13
MN	10.487 ± 0.04 f F	928.08 ± 9.27 a A	729.58 ± 5.04 a A	198.50 ± 2.99 a A	78.61	1.22

1) 土壤净化率= 地上部吸收镉量/土壤总镉量

富集系数 (bioaccumulation coefficient) 作为植物体内重金属含量与相应土壤中重金属含量之比^[29], 反映着植物对重金属的富集能力. 植物对某种重金属的富集系数越大, 表明其对该重金属富集能力就越强, 也就越有利于污染土壤的修复^[18]. 图 3 表明, 除 CK 外各修复措施都不同程度地提高了苕麻对镉的富集, 并且其富集系数都大于 1, 达到了富集植物的要求. 组合配施处理其富集系数均明显大于单施

处理, 说明 EDTA 和柠檬酸与泥炭配施的富集能力高于其单施处理, 并且两者无显著差异. 因此, 泥炭和螯合剂的配施能促进苕麻对镉的富集, 具有更好的修复效果.

3 结论

(1) 镉污染土壤中施加泥炭能提高土壤有机质含量, 促进植物生长. 柠檬酸与泥炭的配施处理优于 EDTA 与泥炭配施处理的效果, 这和 EDTA 本身具有生物毒性有关.

(2) 螯合剂和泥炭组合配施能更多地提高土壤中交换态镉的比例, 其中 EDTA 在影响土壤中镉活性方面作用较大. 泥炭高含量有机质使得可溶性有机物更易与重金属离子形成络合物, 使其生物有效性提高, 增强植物修复效果.

(3) 在促进植物吸收镉能力方面, 2 种螯合剂与泥炭组合不仅都能促进镉从根部向地上部分转移, 提高地上部镉富集能力, 并且对土壤中镉的净化效果也更好, 其中柠檬酸与泥炭的组合处理由于生物量较大, 使植株总含镉量略高于 EDTA 与泥炭的组合处理, 更有利于镉污染土壤的修复.

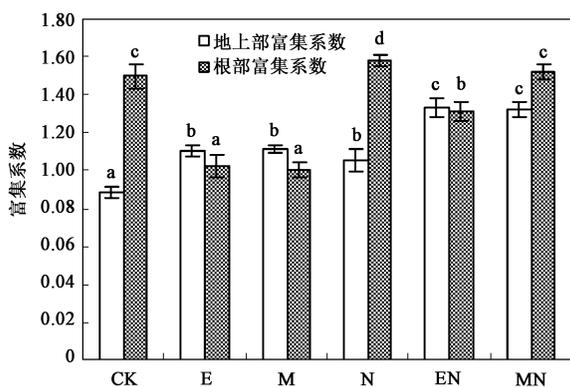


图 3 不同修复措施下苕麻对镉的富集系数比较

Fig. 3 Cd bioaccumulation coefficient of ramie in different applications

- 参考文献:
- [1] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15.
- [2] 利锋. 镉污染土壤的植物修复[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(8): 22-26.
- [3] 茹淑华, 苏德纯, 王激清. 土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 29-33.
- [4] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 264-265.
- [5] 骆永明. 污染土-水环境的植物修复——一种绿色净化技术[A]. 见: 中国土壤学会. 迈向 21 世纪的土壤科学[C]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2000. 135-138.
- [6] 杨帆, 刘雷, 黄精明. 重金属污染土壤植物修复强化措施的研究[J]. 江西科学, 2007, 25(2): 229-232.
- [7] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, *et al.* Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents [J]. Environ Sci Technol, 1997, 31(3): 860-865.
- [8] 陈柳燕, 张黎明, 李福燕, 等. 整合诱导植物修复技术在土壤重金属污染治理中的应用[J]. 华南热带农业大学学报, 2007, 13(3): 18-23.
- [9] Romheld V, Marschner H. Rhythmic iron stress reactions in sunflower at suboptimal iron supply [J]. Physiol Plant, 1981, 3(53): 347-353.
- [10] Bell P F, Chaney R L, Angle J S. Free metal activity and total metal concentrations as indices of metal availability to barley [J]. Plant and Soil, 1991, 130(1): 51-62.
- [11] McLaughlin M J, Smolders E, Merckx R, *et al.* Plant uptake of Cd and Zn in chelator-buffered nutrient solution depends on ligand type [A]. In: Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment, Proceedings of the VIII International Plant Nutrition Colloquium [C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. 113-118.
- [12] 马伟芳, 赵新华, 孙井梅, 等. EDTA 在植物修复复合污染河道疏浚底泥中的调控作用[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 85-90.
- [13] 赖发英, 叶青华, 涂淑萍, 等. 重金属污染地区的植物调查与研究[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(3): 455-457.
- [14] 王凯荣, 龚惠群, 王久荣. 栽培植物的耐镉性与镉污染土壤的农业利用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 196-199.
- [15] Tessier A, Campbell P G C, Blsson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Anal Chem, 1979, 51(7): 844-851.
- [16] 赵小钊. 泥炭有机肥料的开发和利用[J]. 农业与技术, 2000, 20(1): 42-43.
- [17] 严重玲, 李瑞智, 钟章成. 模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特性的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(增刊): 124-131.
- [18] 梁彦秋, 潘伟, 刘婷婷, 等. 有机酸在修复 Cd 污染土壤中的作用研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(8): 76-78.
- [19] 梁彦秋, 刘婷婷, 铁梅, 等. 镉污染土壤中镉的形态分析及植物修复技术研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(2): 57-58.
- [20] 杜彩艳, 祖艳群, 李元, 等. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-542.
- [21] 王良梅, 周立祥, 黄焕忠. 水溶性有机物在土壤中的吸附及对 Cu 沉淀的抑制作用[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 754-759.
- [22] Kalbitz K, Wennich R. Mobilization of heavy metal and in polluted wetland soil and its dependence on dissolved organic matter [J]. Sci Total Environ, 1998, 209: 27-39.
- [23] Dawson H J, Ugolini F C, Hnutford B F, *et al.* Role of soluble organics in soil processes of a podzol, Central Cascades, Washington [J]. Soil Sci, 1978, 126(5): 290-296.
- [24] Kalbitz K, Popp P, Geyer W, *et al.* β -HCH mobilization in polluted wetland soils as influenced by dissolved organic matter [J]. Sci Total Environ, 1997, 204(1): 37-48.
- [25] Raulund-Rasmussen K, Borriggaard O K, Hansen H C B, *et al.* Effect of natural soil solutes on weathering of soil minerals[J]. Eur J Soil Sci, 1998, 49(3): 397-406.
- [26] Dosskey M G, Bertsch P M. Transport of dissolved organic matter through a study forest soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61(3): 920-927.
- [27] Fischer K, Bipp H P, Riemschneider P, *et al.* Utilization of biomass residues for the remediation of metal polluted soils [J]. Environ Sci Technol, 1998, 32(14): 2154-2161.
- [28] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1083-1087.
- [29] Salt E D, Blaylock M, Kumar N P, *et al.* Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. Bio Technol, 1995, 13(5): 468-474.