

EDTA 在植物修复复合污染河道疏浚底泥中的调控作用

马伟芳, 赵新华, 孙井梅, 黎荣

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 通过温室盆栽试验, 在黑麦草修复重金属(Zn, Pb, Cu, Cd, Ni)-有机物复合污染的城市排污河道疏浚底泥的过程中投加 $3\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ EDTA(分 1 次 2 次 3 次投加), 研究了对黑麦草生长及重金属积累、底泥特性和 TOC 的影响。结果表明, 投加 EDTA: ①增加了黑麦草体内积累的重金属数量, 其中分 3 次投加的效果最为显著, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd 在地上部分的积累量分别较对照增加了 2.74、1.99、1.59、1.55 和 7.78 倍; 分 3 次投加明显降低了黑麦草的叶绿素含量, 1 次投加叶绿素含量没有明显变化。②对底泥的 pH 没有明显的影响, 但显著增加了底泥中 NH_4OAc 提取态和 DTPA 提取态的重金属量。③底泥大颗粒体积分百分比变大; 其中分 3 次投加底泥颗粒体均粒径增大、比表面积减小、晶格强度减小, 有助于底泥颗粒释放吸附的重金属。④提高了底泥中微生物的数量, 其中分 2 次 3 次投加, 微生物数量是对照试验的 1.33 和 1.47 倍; 明显降低了底泥的脲酶活性, 但对过氧化氢酶活性的影响不明显。⑤增加了底泥的 TOC 含量。

关键词: EDTA; 植物修复; 黑麦草; 排污河道疏浚底泥; 重金属-有机污染物; 复合污染

中图分类号: X175.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)01-0085-06

Roles of EDTA on Phytoremediation of Combined Contamination in Dredged Sewage River Sediment

MA Weifang, ZHAO Xin-hua, SUN Jing-mei, LI Rong

(College of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the roles of EDTA in phytoremediation of heavy metal-organic contaminated dredged sewage river sediment by *Lolium multiflorum* L. $3\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ EDTA was added to sediment through three manners (once, twice and three times, respectively). The results showed that: with adding EDTA to the sediment ①The accumulation amount of heavy metals to *Lolium multiflorum* L. increased, especially by added EDTA three times. Compared with the control, the accumulation of Pb, Zn, Cu, Ni, Cd in shoots increased 2.74, 1.99, 1.59, 1.55 and 7.78 times by added EDTA three times. The net increment was $32.33\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1393.56\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $64.42\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $36.57\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $10.33\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Furthermore, the concentration of chlorophyll decreased by 42% with 3 times EDTA addition, while the concentration of chlorophyll has no significant change with once EDTA addition. ②pH hasn't much change, while NH_4OAc and DTPA extractable heavy metal amount from sediment increased significantly. ③The bulk percentage of big particle sediment increased. By added EDTA three times to sediment, the average particle size of sediment increased, while specific surface area and crystal lattice intensity decreased, which were contributed to the desorption of heavy metal from sediment particle. ④Compared with the control, the amount of microorganism in sediment was increased 1.33 times and 1.47 times with adding EDTA twice and three times. The urease activity decreased, while the catalase activity hasn't much change. ⑤OC content was increased.

Key words: EDTA; phytoremediation; *Lolium multiflorum* L.; dredged sewage river sediment; heavy metal-organic contamination; combined contamination

排污河道沉积物(底泥)受到重金属和有机物的双重污染, 而传统的疏浚底泥处置方法——脱水、堆置会造成土壤和地下水的污染, 因此合理的处置疏浚底泥尤为重要; 但河道疏浚底泥的修复常常由于其庞大的体积在技术、经济上难于实施^[1]。植物修复是一项绿色、环境友好和廉价的污染治理技术^[2], 超积累植物不仅能够吸收不同的重金属元素, 同时还能降解环境中的有机污染物。而超积累植物积累的重金属数量不仅受土壤溶液中重金属浓度的控制, 而且与土壤固相结合态的重金属浓度密切

相关^[3]。因而 EDTA、低分子量有机酸等有机络合物常被用来活化土壤中吸附态的重金属, 以促进其向植物地上部运输, 提高植物修复效率^[4]。但投加 EDTA 等有机螯合剂活化土壤重金属的同时会增大重金属污染地下水的潜在危险性^[4]。EDTA 在土壤中的降解周期和特性及 EDTA 的最终降解产物等

收稿日期: 2005-01-10; 修订日期: 2005-03-14

基金项目: 天津市科技发展计划项目(043111811)

作者简介: 马伟芳(1975~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为沉积物资源化与环境系统优化, E-mail: mpeggy@163.com

问题,一直是受到关注和亟待解决的问题。

植物修复的最大优点是它保持了土壤的原有功能、特性和再耕种性,因此被称为绿色修复^[5]。然而对于投加的 EDTA 是否会影响植物生理生态过程、改变土壤理化性质、降低土壤生物学功能,如土壤微生物种类、数量和土壤酶活性等方面的研究还较少。因此,本文研究了黑麦草修复重金属(Zn, Pb, Cu, Cd, Ni)-有机物复合污染的城市排污河道疏浚底泥的过程中分不同的次数投加 EDTA,对植物重金属积累量、叶绿素含量、底泥中的微生物种类和数量、底泥酶活性、颗粒分布和晶格强度以及底泥 TOC 的影响,分析了植物和底泥特性的变化与植物修复效率的关系,为植物修复重金属污染底泥或土壤的有机调控提供科学依据和实践方法。

1 材料与方法

1.1 底泥样品

供试河道底泥采自天津市大沽排污河的疏浚底泥,大沽排污河由于常年承担天津市生活污水和工业废水的排放,因此底泥中沉积了大量的重金属和有机污染物。供试底泥风干后过 2mm 尼龙筛备用。底泥基本性质如下:阳离子交换量 $496\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; TOC 含量 17.8%;矿物油 4.86%;全氮 0.25%; pH7.32;底泥的各项理化性质测定参照 SSICA^[6]。底泥中全量 Zn, Pb, Cu, Cd, Ni 分别为:6 584.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、297.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、461.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、5.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、189.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 盆栽试验

采用温室盆栽试验,称取 1.2kg 风干后过 2mm 筛的底泥,将盆中底泥用去离子水调至 60% 持水率(WHC),然后将 30 粒种子播入盆中,每个实验设 3 个重复,并保持其持水率为 60%。黑麦草生长 42d 后投加 EDTA,EDTA 的加入量分别为:1 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、3 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,由于投加 5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ EDTA 的植物存活量降低了 40%,因此本试验选择投加 EDTA 3 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干泥。

EDTA 施用方法分 3 种:3 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干泥的 EDTA 1 次施入底泥;分 2 次施入(每 4d 施 1 次,每次 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$);分 3 次施入(每 2d 施入 1 次,每次 1 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$),设置不投加 EDTA 的对照试验。从第一次施入 EDTA 后开始,黑麦草再生长 12d,收获后分地上和地下部分分别用去离子水洗净、烘干。

1.3 分析方法

(1)底泥重金属总量测定采用 HCl、HF、HClO₄ 消解;NH₄OAc (1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 DTPA (0.005 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 提取态的重金属,采用 1:5 的液土比,以 120r/min 振荡 4h,3 500 r/min 离心 10min。日立 180-80 偏振塞曼原子吸收光谱仪测定重金属含量。

(2)植物收获洗净,在 80℃ 烘干 24h,称干重(约 0.3g),加入 10mL 逆王水(HNO₃:HCl=3:1,体积比)冷消化 1d,然后热消化,使溶液近干,加入 5mL HClO₄,使冒白烟,再加入 HNO₃,使彻底消化,蒸馏水定容,日立 180-80 偏振塞曼原子吸收光谱仪测定重金属含量,数据用 SAS 软件进行统计检验。

(3)叶绿素含量测定采用 80% 的丙酮溶液提取,采用分光光度计在波长 663nm、646nm、和 470nm 下分别测定叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的吸光度,根据在该波长下的吸光系数求出叶绿素含量^[7]。

(4)底泥 pH 的测定采用 1:5 土液比,pH 计测定。

(5)底泥颗粒分布采用超声波分散 15min,激光粒度分析仪(MASTERSILERSION)测定,晶格强度的测定采用 X-衍射仪(型号 Rigaku D/max 2500 v/pc)。

(6)底泥中微生物数量测定采用稀释平板法。细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,放线菌采用高氏 1 号培养基,真菌采用察氏培养基^[8]。

2 结果与讨论

2.1 EDTA 对黑麦草生长及重金属吸收的影响

2.1.1 黑麦草生长和叶绿素的变化

表 1 为不同次数投加 EDTA 对黑麦草的株高、生物量及叶绿素含量的影响。由表 1 可见,分不同的次数投加 EDTA 对黑麦草的株高和生物量没有明显的影响,各处理与对照试验之间的株高、地上部分和根重均无显著差异。叶绿素是植物生长的物质基础,影响植物的生理活动必然影响植物的叶绿素含量^[9],投加 EDTA 后黑麦草的叶绿素含量减少,其中以分 3 次投加 EDTA 的最为明显,说明影响了植物的生理代谢活动。

2.1.2 黑麦草对重金属的吸收

图 1 为分不同的次数投加 EDTA 对黑麦草积累重金属 Zn, Pb, Cu, Cd, Ni 的影响。由图 1 可见,投加 EDTA 不同程度的增加了黑麦草对重金属的积累数量,提高了植株地上部分和地下部分的重金属含量的比值,提高了植物的修复效率,这可能是由

于投加的 EDTA 增加了底泥溶液中植物有效态重金属的含量(图 3 所示),并引起了植物生理特性的损伤^[10],从而导致了植物对重金属没有选择的大量吸收。

表 1 EDTA 对黑麦草株高、生物量和叶绿素含量的影响¹⁾

Table 1 Effect of EDTA on height, biomass and chlorophyll concentration of *Lolium multiflorum* L.

处理	株高/cm	生物量/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$		叶绿素含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
		地上部分	根	
1 号	18.9 $\pm$ 1.7	12.56 $\pm$ 1.09	3.12 $\pm$ 0.57	3.09 $\pm$ 0.18
2 号	19.4 $\pm$ 2.3	12.10 $\pm$ 1.37	3.21 $\pm$ 0.42	2.24 $\pm$ 0.31
3 号	19.4 $\pm$ 2.6	11.56 $\pm$ 1.09	3.27 $\pm$ 0.84	1.99 $\pm$ 0.43
4 号	15.3 $\pm$ 2.35	14.27 $\pm$ 1.23	3.54 $\pm$ 0.44	3.43 $\pm$ 0.49

1)表中 1 号 2 号 3 号分别为分 1 次 2 次 3 次投加 EDTA, 4 号为不投加 EDTA 的对照试验,下同。

从图 1 的整个趋势来看,分 3 次投加对黑麦草

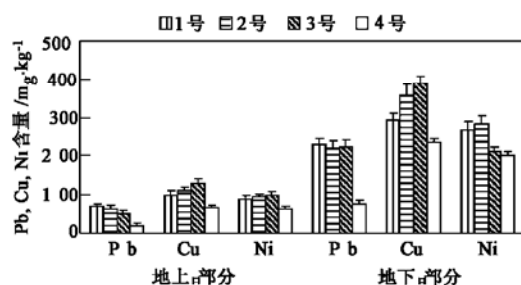


图 1 EDTA 对黑麦草吸收重金属的影响(误差线表示标准差,下同)

Fig. 1 Effect of EDTA on heavy metals accumulation by *Lolium multiflorum* L.

(error bars in Y axis represent the standard error, the same as below)

2.2 EDTA 对底泥特性的影响

2.2.1 底泥 pH 的变化

图 2 为分不同的次数投加 EDTA 对底泥 pH 的影响。由图 2 可见投加 EDTA 后底泥的 pH 略有降低,其中以一次投加的最为明显,但各处理之间的差异不显著($p > 0.05$),说明投加 EDTA 并没有引起底泥 H^+ 浓度的明显变化,底泥溶液中植物有效态重金属浓度的增加不是由于酸化作用而导致。

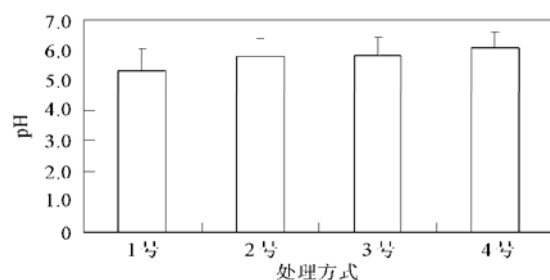


图 2 EDTA 对底泥 pH 的影响

Fig. 2 Effect of EDTA on pH

2.2.2 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属的数量

积累重金属数量的促进作用最为明显,其中地上部分积累的 Pb、Cu、Ni、Zn、Cd 数量分别比不投加 EDTA 的对照试验增加了 2.74、1.99、1.59、1.55 和 7.78 倍,净增量分别为 $32.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1393.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $64.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $36.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $10.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而 Pb 的积累数量变化为分 1 次投加黑麦草有更高的含 Pb 量。这是因为利用萃取剂提取出来的有效态重金属可以评估土壤中重金属的有效性,表示植物对重金属的吸收与有效态重金属的相关性^[11],在分不同的次数投加 EDTA 处理的底泥中 DTPA 提取态和 NH_4OAc 提取态的 Pb 量以 EDTA 1 次投加高于 2 次投加,后者又高于分 3 次投加(图 3 所示),导致 1 次投加 EDTA Pb 在黑麦草体内的积累数量最大。

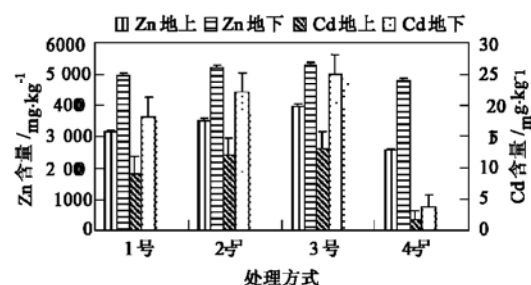


图 3 和图 4 为分不同的次数投加 EDTA 对底泥中 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属数量的影响。由图 3 和图 4 中可见,投加 EDTA 提高了底泥 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属的数量,是由于 EDTA 并非专一性的螯合剂^[12],土壤中的重金属离子都会与其螯合,因此不同重金属的 NH_4OAc 及 DTPA 提取态数量均有增加。其中分 3 次投加对提取态的 Cu、Ni、Zn、Cd 数量增加最大,只有 Pb 为分 1 次投加的增量最大。这可能与 Pb 和底泥的特殊复合或吸附作用相关,由于底泥中的 Pb 易被有机质、氧化物、黏土矿物复合或吸附,且易形成磷酸盐、碳酸盐沉淀;EDTA 与 Cu、Ni、Zn、Pb 的螯合系数分别为:18.8、18.6、16.5 和 18.0,低浓度 EDTA 处理,与土壤 Pb 螯合的 EDTA 量有限^[13],而导致 1 次投加 EDTA 与 Pb 螯合的数量较大,从而分 1 次投加提取态 Pb 的增量最大。

由图 1、图 3、图 4 可见,2 种螯合剂提取态的重金属增量变化趋势和植物体内积累的重金属数量增量的变化趋势相同,其中 DTPA 提取态的重金属和

植物体内积累的重金属数量有更好的相关关系. 由于投加的螯合剂 EDTA 可以与重金属形成螯合物进入到溶液中, 从而解吸出被底泥颗粒吸附的重金属, 因此增加了底泥中 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属数量; 而这些溶液中 EDTA-重金属螯合物可以进入植株的根系并向地上部分运输, 因为对黑麦草根和叶的 XRD 分析检测到 EDTA-Pb 和 EDTA-Zn, 从而提高了植物体内的重金属含量, 因此提取态的重金属数量和 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属数量有相同的变化趋势.

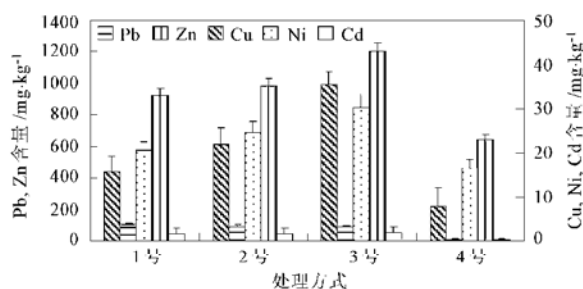


图3 EDTA 对 NH_4OAc 提取态重金属的影响

Fig. 3 Effect of EDTA on NH_4OAc extractable heavy metal amount

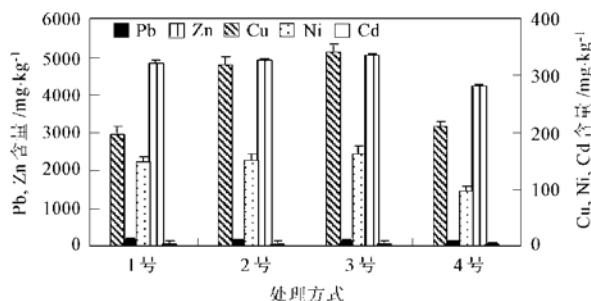


图4 EDTA 对 DTPA 提取态重金属的影响

Fig. 4 Effect of EDTA on DTPA extractable heavy metal amount

2.2.3 TOC 的变化

图5为投加 EDTA 对底泥 TOC (以底泥中总有机碳含量与底泥重量的百分比表示) 的影响. 由图5可见, 对照试验中黑麦草修复后的底泥 TOC 降解率达到 71.3%; 而投加 EDTA 的底泥 TOC 含量比对照试验高 1.0~1.2 倍. 虽然投加的 EDTA 数量不足以使底泥 TOC 含量的增大达到显著水平, 这可能是由于投加的 EDTA 引起根系分泌物的数量增大、底泥中微生物数量的增加和有机污染物降解率降低所导致, 因为土壤溶液取样器取得的底泥溶液的离子色谱分析检测到底泥中原来没有的草酸根和柠檬酸根, 且投加 EDTA 的底泥溶液中这些酸根

离子的浓度明显大于对照试验; 投加 EDTA 的根际底泥中的微生物数量也较对照显著增加(见表3); 底泥中有机物的色谱-质谱 (HP-5971A) 分析也发现投加 EDTA 降低了部分有机物的降解率, 从而导致了底泥 TOC 含量的大量增加.

虽然 TOC 的增大并非完全是 EDTA 在底泥中不能被降解所致, 但 EDTA 滞留在底泥中而长期不能被降解^[14] 及其因此而引起的底泥性质的改变, 从而引起对后续作物生长和植物修复效果的影响问题, 应予以足够的重视.

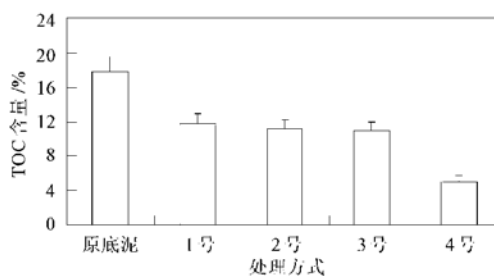


图5 EDTA 对底泥 TOC 的影响

Fig. 5 Effect of EDTA on TOC

2.2.4 对底泥晶格强度和颗粒分布的影响

图6为分不同的次数投加 EDTA 及对照试验的底泥 X-衍射图(XRD, Rigaku D/max 2500v/pc).

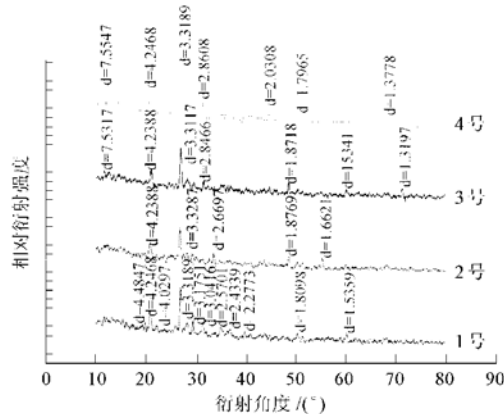


图6 底泥的 XRD 图

Fig. 6 X-ray diffractograms of sediments

由图6可见, 分1次投加 EDTA 底泥的晶格强度与对照相比没有太大的变化, 但是分2次和3次投加 EDTA 的底泥晶格强度有所减小, 但没有达到显著水平. 根据 XRD 分析结果, 1次投加 EDTA 检测到 EDTA-Zn 和 EDTA-Ni, 但分2次和3次投加没有发现重金属螯合物; 投加 EDTA 的底泥均能检测到 EDTA 分子的残留, 其中以分1次投加的残留

量最大. 因此, 从提高植物修复效果和减少重金属淋溶的角度出发, 应该分次投加 EDTA, 而不应 1 次投加.

图 7 和表 2 为投加 EDTA 对底泥颗粒分布和比表面积的影响. 由图 7 可见, 分 1 次和 2 次投加 EDTA 对底泥颗粒的平均粒径和比表面积没有明显的影响, 但分 3 次投加明显增大了底泥颗粒的粒径、减小了颗粒的比表面积, 因此降低了底泥颗粒对重金属的吸附数量, 减少了与固相结合态的重金属浓度, 利于重金属向溶液中转化, 因此更有利于植物吸收, 提高修复效果. 从图 7 中还可以看到, 投加 EDTA 后在粒径 500~1 000 μm 之间的大颗粒底泥的体积百分比明显高于对照, 说明 EDTA 可以胶结聚合底泥颗粒, 增大颗粒的比表面积, 从而减少底泥颗粒固结的重金属. 因此在工程实践中应分 3 次投加 EDTA 更有利于提高植物修复效果.

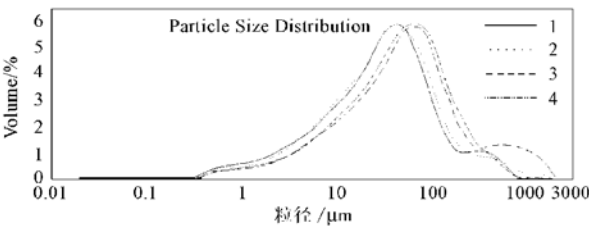


图 7 底泥的颗粒分布
Fig. 7 Particle size distribution of sediment

表 2 EDTA 对底泥颗粒分布和比表面积的影响
Table 2 Effect of EDTA on particle size distribution and specific surface area of sediment

处理 方式	体均粒径 /μm	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	d(0.1) /μm	d(0.5) /μm	d(0.9) /μm
1 号	77.229	0.519 3	5.444	46.915	188.142
2 号	79.024	0.511 6	5.986	48.308	191.630
3 号	140.367	0.467 6	6.502	51.525	358.942
4 号	79.194	0.510 7	6.109	49.349	185.675

2.2.5 对根际微生物种类、数量和酶活性的影响

表 3 为投加 EDTA 对根际微生物种类和数量的影响. 投加 EDTA 后微生物的总量增幅达到显著水平, 其中细菌的数量变化占主导地位, 其与微生物总量的变化趋势相同, 与生物有效性重金属数量没有显著的相关性. 放线菌的数量随投加 EDTA 的数量减少也达到显著水平, 其变化趋势与底泥中有效态的重金属数量成负相关关系, 这与土壤中 3 大菌群对重金属的耐性和敏感性的大小顺序相同: 真菌 > 细菌 > 放线菌^[15]. 由于微生物可以降解底泥中的有机污染物, 改变底泥中重金属的存在形态, 因此微

生物数量的增加对于提高植物修复的进程也有一定的贡献.

表 3 EDTA 对根际微生物种类和数量的影响 × 10⁵/个·g⁻¹

Table 3 Effect of EDTA on the species and amount of rhizosphere microorganisms × 10⁵/cells·g⁻¹

微生物	1 号	2 号	3 号	4 号
微生物总数	243(64) ¹⁾	282(94)	312(89)	212(44)
细菌	230(81)	272(56)	304(71)	199(68)
真菌	0.73(0.15)	0.71(0.18)	0.66(0.16)	0.72(0.15)
放线菌	12.27(1.16)	9.65(1.07)	7.66(1.98)	12.56(1.34)

1) 括号内的数字表示标准差, 余同.

酶驱动着土壤的代谢, 对土壤圈中污染物的净化具有重要的作用, 且酶活性的大小综合反映了土壤理化性质和重金属浓度的高低, 特别是脲酶的活性对于反映土壤重金属污染具有重要检测价值^[16]. 图 8 为投加 EDTA 对底泥酶活性的影响. 投加 EDTA 明显降低脲酶的活性, 而对过氧化氢酶活性的影响不明显, 其中 1 次投加 EDTA 对酶活性的影响最为显著. 这是由于投加 EDTA 提高了底泥溶液中重金属的浓度, 并且提高了底泥中 DTPA 提取态和 NH₄OAc 提取态的重金属数量, 提高了重金属的生物有效性, 因此这些形态的重金属数量的增大降低了酶活性. 图 8 中酶活性的降低趋势和图 5 中 TOC 的增加规律是一致的, 这也说明了酶对有机物的降解有重要的促进作用. 因此, 在实践中分次投加 EDTA 更有利于植物修复有机物和重金属复合污染的底泥或土壤.

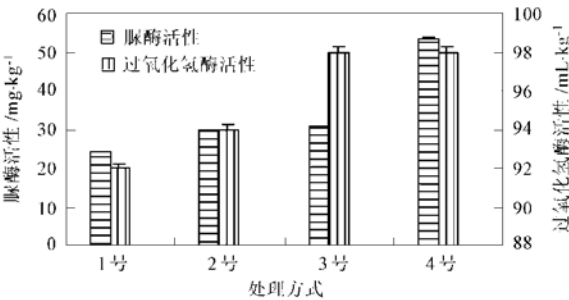


图 8 EDTA 对底泥酶活性的影响
Fig. 6 Effect of EDTA on enzyme activity

3 结论

(1) 施用 EDTA 对植物的株高和生物量没有显著的影响; 但增加了黑麦草对重金属的积累量, 提高了植株地上部分和地下部分的重金属含量的比值, 明显降低了黑麦草的叶绿素含量, 其中以分 3 次投

加 EDTA 最为明显,说明影响了植物的生理代谢活动.投加 EDTA 提高了底泥中与生物有效性相关的 NH_4OAc 及 DTPA 提取态重金属的数量,但底泥的 pH 并没有明显改变,说明其增加不是由于酸化作用而导致.

(2) TOC 含量的增加和 XRD 分析结果都表明在实践中投加 EDTA 要考虑 EDTA 的降解和 EDTA 重金属螯合物的淋溶问题,而分不同的次数投加可以减弱这 2 种情况对环境的风险.分 3 次投加 EDTA 明显增加了底泥颗粒的粒径,降低了其比表面积,有利于底泥颗粒吸附重金属的释放,且增加了根际的微生物数量,这些底泥特性的变化都有利于加速植物修复的进程.

(3) 虽然投加 EDTA 后降低了酶的活性,但分次投加可以减弱对酶活性的影响.总体来看,投加 EDTA 虽然对植物和底泥特性有一定的影响,但其有利于加速植物修复,而分次投加 EDTA 不仅可以加速植物修复,还能减弱其带给底泥和环境的不利影响.

参考文献:

- [1] Forstner U, Calmano W. Characterisation of dredged materials [J]. Water Science and Technology. 1998, **38**: 149~ 157.
- [2] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals [M]. Cambridge: The University Press, 1998.
- [3] Knight B, Zhao F J, McGrath S P, *et al.* Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution [J]. Plant and Soil, 1997, **197**: 71~ 78.
- [4] 吴龙华, 骆永明, 章海波. 有机络合强化植物修复的环境风险研究 [J]. 土壤, 2001, **4**: 189~ 192.
- [5] Cafer Turgut, Katie Pepe M, Teresa Cutright J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr and Ni from soil using *Helianthus annuus* [J]. Environmental pollution, 2004, **131**: 147~ 154.
- [6] 中国土壤学会. 土壤物理化学分析方法 [M]. 上海: 上海科学出版社, 1980.
- [7] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所微生物研究室. 土壤微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [9] 张福锁. 植物营养生理生态学和遗传学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [10] Collins R N, Merrington G, McLaughlin M J, *et al.* Uptake of intact zinc-ethylenediaminetetraacetic acid from soil is dependent on plant species and complex concentration [J]. Envir. on Toxicol. Chem., 2002, **21** (9): 1940 ~ 1945.
- [11] 刘玉荣, 党志, 尚爱安, 等. 几种萃取剂对土壤中重金属生物有效部分的萃取效果 [J]. 土壤与环境 2002, **11** (3): 245~ 247.
- [12] Tiedje J M. Microbial degradation of ethylenediaminetetraacetate in soils and sediments [J]. Appl. Microbiol., 1975, **30**: 327~ 329.
- [13] 陈亚华, 李向东, 刘红云, 等. EDTA 辅助下油菜修复铅污染土壤的潜力 [J]. 南京农业大学学报 2002, **25** (4): 15~ 18.
- [14] Andrew Hong P K, Chelsea Li, Banerji Shankha K, *et al.* Extraction, recovery, and biostability of EDTA for remediation of heavy metal-contaminated soil [J]. Journal of soil contamination, 1999, **8**: 81~ 83.
- [15] Horiki M. Effects of heavy metal contamination on soil microbial population [J]. Soil Sci. Plant Nutri., 1992, **38**: 141 ~ 147.
- [16] 和文祥, 陈会明. 汞砷铬元素污染土壤的酶监测研究 [J]. 环境科学学报, 2000, **20** (3): 338~ 343.