

## 不同螯合剂诱导下黑麦草对铅污染土壤的修复效果研究

刘宝勇, 陶晓楠\*, 杨奇丽, 郑晶伦, 赵志浩 (辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要** [目的]探究3种土壤螯合剂作用下黑麦草对 $Pb^{2+}$ 的富集作用和转运效果。[方法]通过盆栽试验,研究乙二胺四乙酸(EDTA)、氯化铁( $FeCl_3$ )和柠檬酸(CA)3种螯合剂对黑麦草修复不同浓度铅污染土壤的修复效果。[结果]黑麦草对 $Pb^{2+}$ 有良好的耐受性和富集作用,低浓度( $\leq 500$  mg/kg) $Pb^{2+}$ 促进黑麦草生长,高浓度( $\geq 1\ 000$  mg/kg) $Pb^{2+}$ 抑制黑麦草生长。EDTA作用下,黑麦草对不同浓度 $Pb^{2+}$ 污染土壤均有良好的富集作用; $FeCl_3$ 作用下,黑麦草对高浓度 $Pb^{2+}$ 污染土壤的耐受性和富集作用最好;CA作用下,黑麦草对低浓度 $Pb^{2+}$ 污染土壤的富集作用最好。[结论]施用EDTA和 $FeCl_3$ 后,能显著促进 $Pb^{2+}$ 从黑麦草根部分向茎叶部位转移,从而提高污染场地土壤修复效果。

**关键词** 铅污染;土壤螯合剂;植物修复;富集作用

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)02-0055-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.015



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Remediation Effect of Ryegrass on Lead Contaminated Soil Induced by Different Chelators

LIU Bao-yong, TAO Xiao-nan, YANG Qi-li et al (College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

**Abstract** [Objective] To explore the enrichment effect and translocation effect of  $Pb^{2+}$  by ryegrass under the action of three soil chelators. [Method] The remediation effect of ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA), ferric chloride ( $FeCl_3$ ) and citric acid (CA) on ryegrass remediation of lead-contaminated soil at different concentrations was investigated by pot experiments. [Result] The ryegrass showed good tolerance and enrichment to  $Pb^{2+}$ . Low concentrations ( $\leq 500$  mg/kg) of  $Pb^{2+}$  promoted the growth of ryegrass and high concentrations ( $\geq 1\ 000$  mg/kg) of  $Pb^{2+}$  inhibited the growth of ryegrass. The action of EDTA, ryegrass showed good enrichment to different concentrations of  $Pb^{2+}$  contaminated soil, under the action of  $FeCl_3$ , ryegrass had the best tolerance and enrichment to the soil polluted by high concentration of  $Pb^{2+}$ , and under the action of CA, ryegrass had the best enrichment effect on the soil contaminated with low concentration of  $Pb^{2+}$ . [Conclusion] The application of EDTA and  $FeCl_3$  significantly promoted the transfer of  $Pb^{2+}$  from ryegrass roots to stem and leaf parts, thus improving the remediation effect of contaminated site soil.

**Key words** Lead contaminated; Soil chelators; Phytoremediation; Enrichment effect

近年来,由于工业排放、汽车尾气、农药使用等人为活动影响,我国土壤面临的重金属污染问题日趋加重, Li等<sup>[1]</sup>对我国沈阳市铁西工业区土壤的重金属污染现状进行了研究,其中调查土壤中 $Pb^{2+}$ 污染超标的占比1.5%,位居第二,农产品的质量安全受到严重影响<sup>[2-4]</sup>。重金属污染土壤的修复模式主要包括固化/稳定化、植物修复、微生物修复、化学淋洗、电动修复等<sup>[5-7]</sup>,其中植物修复重金属污染土壤技术具有操作简便、成本低廉、效果持久等优势,近年来成为污染土壤修复领域的研究热点<sup>[8-9]</sup>。植物修复技术是利用植物对土壤内重金属的良好吸收和富集作用,将土壤中的重金属逐渐转移到植物体内,再通过收获植物从而减少土壤中重金属浓度<sup>[10]</sup>。目前,世界上发现的超富集植物有400多种<sup>[11-13]</sup>。螯合诱导技术是最具发展潜力的植物修复强化措施之一<sup>[14-15]</sup>,通过活化土壤中的重金属离子,与重金属离子形成螯合物从而促进植物对重金属的吸收和由根部向地上部转运的能力,进一步达到提高生物有效性、降低重金属植物毒性以及提高重金属积累量和提取效率的目的,在铅污染处理中得到广泛应用<sup>[16-18]</sup>。相关研究表明,乙二胺四乙酸(EDTA)和氨三乙酸(NTA)2种螯合剂在不同施用方式下对不同植物修复铅污染土壤具有强化效应<sup>[19]</sup>,EDTA可以提高土壤

水溶性铅的浓度,促进铅从根部向地上部转运,增加植物地上部铅的浓度和提取量<sup>[20]</sup>。黑麦草是一种重要的牧草和绿化植物,具有适应范围广、生长快速、易于收割的特点,十分适合作为重金属修复植物。该研究选用黑麦草为修复植物,通过盆栽试验,探究乙二胺四乙酸(EDTA)、氯化铁( $FeCl_3$ )和柠檬酸(CA)3种常见重金属螯合剂对黑麦草生长规律和修复铅污染土的强化效果的影响,比较3类螯合剂作用下黑麦草对不同浓度铅污染土壤中重金属的富集作用和转运效果,明确3类螯合剂对强化黑麦草修复铅污染土壤的可行性,以为铅污染土壤植物修复工程提供重要的理论和技术支持。

### 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 该试验所用土壤均取自辽宁省阜新市辽宁工程技术大学校园,土层深度为10~20 cm的表层土,取样时间为2020年4—6月。将土壤取回实验室后烘干破碎,再过2 mm筛,测试土壤的基本理化性质,发现土壤含水率为22.5%、有机质浓度为1.8%,pH为6.85,主要由粉粒组成,占比为54.3%。向土壤中分别加入质量比为2‰尿素、3‰复合肥料和1%生物底肥,搅拌均匀后备用。黑麦草种购买于山东立国农业发展有限公司。供试螯合剂选用乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、氯化铁( $FeCl_3$ )和柠檬酸(CA),选用醋酸铅 $[Pb(CH_3COOH)_2 \cdot 3H_2O]$ 配制铅污染土壤,上述药品均购自上海麦克林生化科技有限公司;所有试剂均为分析纯。

**1.2 试验方法** 试验所用土壤为人工污染土,土壤的 $Pb^{2+}$

基金项目 国家自然科学基金项目(41501217)。

作者简介 刘宝勇(1975—),男,辽宁葫芦岛人,副教授,博士,从事工矿水土保持及矿山环境工程研究。\*通信作者,硕士研究生,研究方向:生态修复理论与技术。

收稿日期 2022-03-07

浓度分别为 0、200、500、1 000 和 2 000 mg/kg,以硝酸铅水溶液的形式分层加至土壤中,同时控制土壤含水率为田间持水率的 70%,密封 2 d 后将土壤搅拌均匀,再次密封平衡 28 d,确保土颗粒-水分子-铅离子能均匀充分结合。取 1.8 kg 处理土壤装入盆内,盆的内径和高度均为 15 cm。先将黑麦草种用浓度 5%的次氯酸钠溶液冲洗一遍,随后放入蒸馏水中浸泡 30 min,再将草种直接播入装有土壤的盆内,每个处理做 4 个重复,共计 20 盆土壤。控制每盆草种的播入量为 20 颗。将播有草种的处理盆直接放在室内养护,温度为 20~28 ℃,相对湿度 50%~70%,确保自然光充足。养护期间每 7 d 喷洒蒸馏水 250 mL,确保土壤含水率控制在田间持水率的 60%~80%。黑麦草种在播下 5 d 左右开始发芽生长,生长 14 d 后,将每盆黑麦草苗均保留到 5 株,确保每盆留存的苗体生长健康且高度基本一致。生长 21 d 后,将浓度为 10 mmol/L 的 EDTA、FeCl<sub>3</sub> 和 CA 溶液分别喷洒至对应试验组的幼苗上,每 7 d 喷洒一次,每次每盆喷洒 50 mL,连续喷洒 3 次后处理完成,未喷洒任何螯合剂的盆栽作为对照组(CK)。继续生长 18 d 后,对盆内黑麦草进行收割测试。

**1.3 测定分析** 将收割的黑麦草苗按照茎叶(地上部分)和根系(地下部分)分开处理,先将茎叶和根系用蒸馏水清洗干净并自然晾干,随后放入烘箱在 105 ℃ 条件下杀青 30 min,再在 75 ℃ 条件下烘干至恒重。采用分析天平分别测试黑麦草根系与茎叶的干重量(生物量),然后再将植物体人工磨碎并过 0.15 mm 筛备用。

采用原子吸收分光光度计对黑麦草根部和茎叶内的铅浓度进行测试分析。取 1.00 g 植物体粉末放入坩埚内,然后置于马弗炉内在 500 ℃ 下灼烧 6 h,冷却后取出,确保植物体完全灰化。向灰化后的植物体内加入 10 mL HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> = 9:4(v/v)的浓酸消解 24 h<sup>[21]</sup>,再采用火焰原子吸收分光光度计对浸出液内 Pb<sup>2+</sup>浓度进行测试,从而得到植物体内的 Pb<sup>2+</sup>浓度。

**1.4 数据处理与分析** 根据测试结果,分析黑麦草生长过程中的铅污染富集效果,分别计算黑麦草耐性指数(TI)、生物富集系数(BCF)和 Pb<sup>2+</sup>转运系数(TF),计算方法如下<sup>[22]</sup>:

$$TI = \frac{\text{研究组植物体生物量(g)}}{\text{对照组植物体生物量(g)}} \quad (1)$$

$$BCF = \frac{\text{根系(或茎叶)Pb}^{2+}\text{浓度(mg/kg)}}{\text{土壤初始 Pb}^{2+}\text{浓度(mg/kg)}} \quad (2)$$

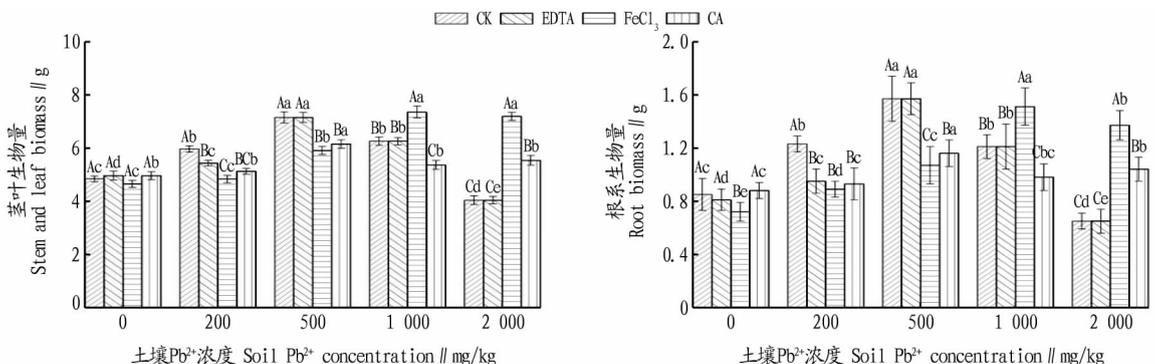
$$TF = \frac{\text{植物茎叶 Pb}^{2+}\text{浓度(mg/kg)}}{\text{植物根系 Pb}^{2+}\text{浓度(mg/kg)}} \quad (3)$$

该试验图形处理利用 Origin 2021 软件完成,统计分析采用 SPSS 20.0 软件完成。

## 2 结果与分析

**2.1 不同螯合剂作用下黑麦草对 Pb<sup>2+</sup>的耐性分析** 从不同土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度作用下黑麦草的生长特性(图 1)可以看出,随着土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度的增大,除 FeCl<sub>3</sub> 处理组外,各处理组黑麦草茎叶和根系生物量均出现先升高后降低的变化趋势,峰值均出现在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 500 mg/kg 时。FeCl<sub>3</sub> 处理组黑麦草茎叶和根系生物量随土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度的增大分别表现出先升高后稳定和先升高后降低的变化趋势,二者峰值均出现在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 1 000 mg/kg 时。

与对照组(CK)相比,不同土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度下 3 种螯合剂对黑麦草茎叶和根系生物量的影响不同。EDTA 处理组黑麦草茎叶和根系生物量在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 200 mg/kg 时显著低于 CK,其他土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度下无显著差异。FeCl<sub>3</sub> 处理组黑麦草茎叶和根系生物量在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 200、500 mg/kg 时显著低于 CK,在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 1 000、2 000 mg/kg 时显著高于 CK;当土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 0 mg/kg 时,FeCl<sub>3</sub> 处理组黑麦草茎叶生物量与 CK 无显著差异,根系生物量显著低于 CK。CA 处理组黑麦草茎叶和根系生物量在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 0 mg/kg 时与 CK 无显著差异,在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 200、500、1 000 mg/kg 时显著低于 CK,在土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 2 000 mg/kg 时显著高于 CK。整体上看,低浓度 Pb<sup>2+</sup>(200 mg/kg)条件下,3 种螯合剂对黑麦草茎叶生长均出现明显的抑制效果,随着 Pb<sup>2+</sup>浓度增大,螯合剂对黑麦草的根系和茎叶生长的抑制出现改善。当土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度为 2 000 mg/kg 时,FeCl<sub>3</sub> 处理组对黑麦草生长促进作用最为显著,黑麦草生物总量提高了约 1 倍。



注:不同小写字母表示同一螯合剂不同浓度间差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同一浓度不同螯合剂间差异显著( $P < 0.05$ )。

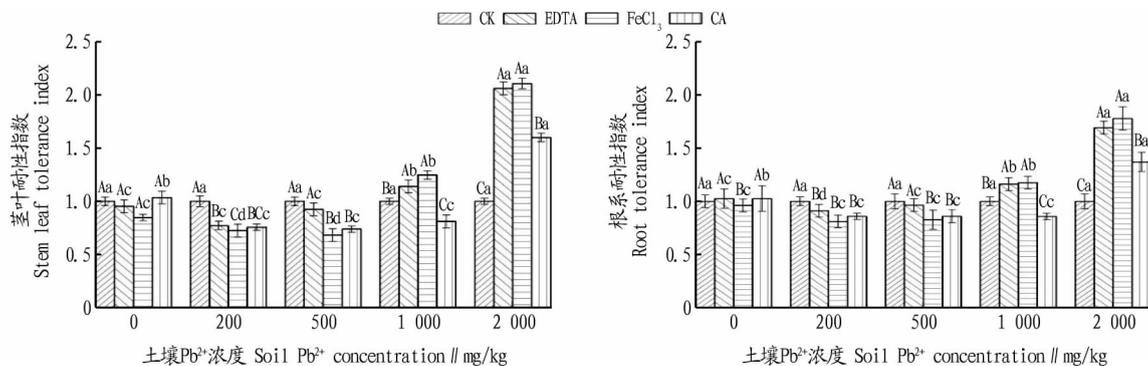
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of the same chelators ( $P < 0.05$ ), different uppercase letters indicate significant difference between different chelators of the same concentration ( $P < 0.05$ ).

图 1 不同土壤 Pb<sup>2+</sup>浓度下黑麦草茎叶与根系的生长状况

Fig.1 Growth of ryegrass stems and leaves and root system under different soil Pb<sup>2+</sup> concentration

植物耐性指数对于污染场地修复效果具有重要的影响,根据公式(1)可计算不同  $Pb^{2+}$  浓度下黑麦草的耐性指数,结果如图 2 所示。当土壤受  $Pb^{2+}$  污染程度不高时(浓度为 200、500 mg/kg),3 种整合剂作用下黑麦草的根系和茎叶耐性指数均小于 1,表明植物生长受到抑制,其中  $FeCl_3$  和 CA 对黑

麦草生长的抑制效果较明显。当土壤受  $Pb^{2+}$  污染程度较高时(浓度 1 000、2 000 mg/kg), $FeCl_3$  和 EDTA 这 2 种整合剂对黑麦草的茎叶和根系生长均具有显著的促进作用。CA 只有在土壤  $Pb^{2+}$  浓度达到 2 000 mg/kg 时才对黑麦草生长表现出促进作用。



注:不同小写字母表示同一整合剂不同浓度间差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同一浓度不同整合剂间差异显著( $P < 0.05$ )。

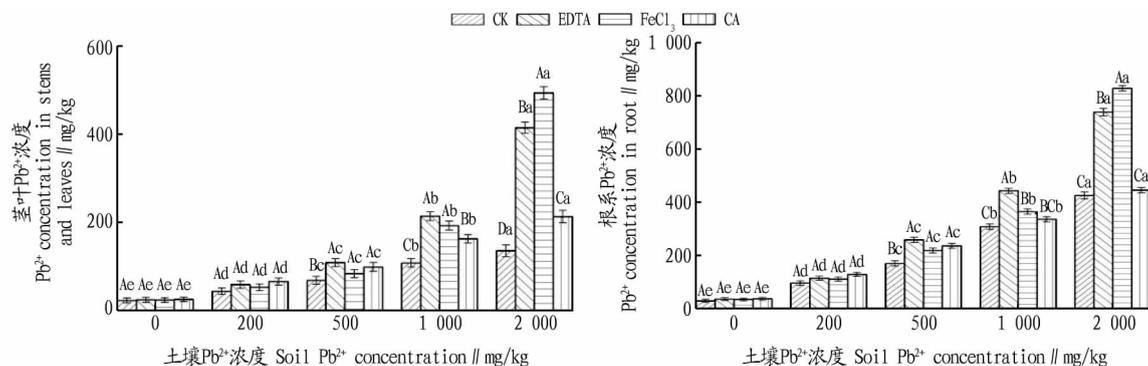
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of the same chelators ( $P < 0.05$ ), different uppercase letters indicate significant difference between different chelators of the same concentration ( $P < 0.05$ ).

图 2 不同土壤  $Pb^{2+}$  浓度下黑麦草茎叶与根系的耐性指数

Fig.2 Tolerance index of ryegrass stem, leaf and root under different soil  $Pb^{2+}$  concentrations

2.2 不同整合剂作用下黑麦草对  $Pb^{2+}$  的富集作用分析 从黑麦草不同部位对  $Pb^{2+}$  的富集作用(图 3)可以看出,随着土壤  $Pb^{2+}$  浓度的增大,黑麦草根系和茎叶  $Pb^{2+}$  浓度均显著增加。不同土壤  $Pb^{2+}$  浓度下,3 种整合剂对黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  浓度的影响有所差异。EDTA 处理组和  $FeCl_3$  处理组黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  浓度在土壤  $Pb^{2+}$  浓度为 0、200 mg/kg 时高于 CK,在其他土壤  $Pb^{2+}$  浓度下显著高于 CK。CA 处理组黑麦草茎叶  $Pb^{2+}$  浓度在所有土壤  $Pb^{2+}$  浓度下均高于 CK。

CA 处理组黑麦草根系  $Pb^{2+}$  浓度在土壤  $Pb^{2+}$  浓度为 500 mg/kg 时显著高于 CK,其他土壤  $Pb^{2+}$  浓度下无显著差异。整体而言,当土壤中  $Pb^{2+}$  浓度高于 1 000 mg/kg 时, $FeCl_3$  和 EDTA 对提升黑麦草富集  $Pb^{2+}$  效果更为显著。对于  $Pb^{2+}$  浓度为 2 000 mg/kg 土壤,施加  $FeCl_3$  整合剂后,黑麦草茎叶和根系对  $Pb^{2+}$  的富集量分别为 492.4 和 827.6 mg/kg,相比于 CK 对照组分别提高了 2.64 和 0.95 倍。



注:不同小写字母表示同一整合剂不同浓度间差异显著( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示同一浓度不同整合剂间差异显著( $P < 0.05$ )。

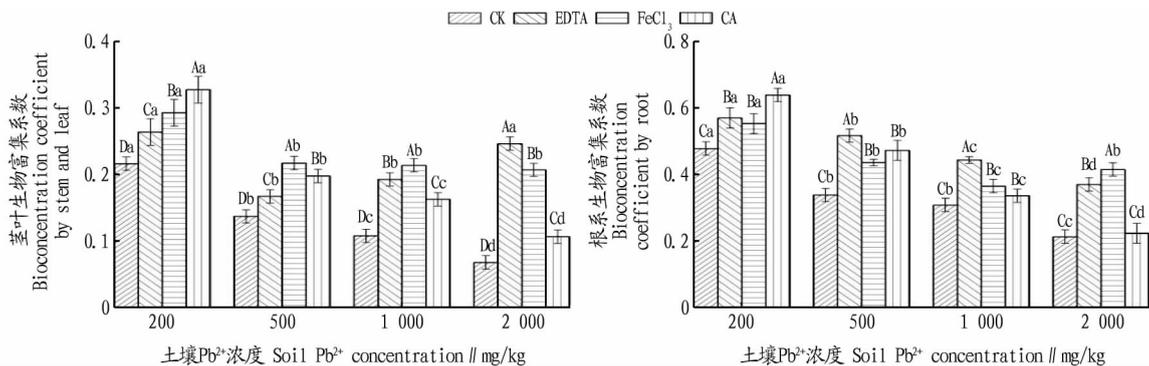
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of the same chelators ( $P < 0.05$ ), different uppercase letters indicate significant difference between different chelators of the same concentration ( $P < 0.05$ ).

图 3 不同土壤  $Pb^{2+}$  浓度下黑麦草茎叶与根系对  $Pb^{2+}$  的富集作用

Fig.3 Enrichment of  $Pb^{2+}$  by stems, leaves and roots of ryegrass in different soil  $Pb^{2+}$  concentrations

根据公式(2)计算不同土壤  $Pb^{2+}$  浓度下黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  的生物富集系数,结果如图 4 所示。不同土壤  $Pb^{2+}$  浓度下,黑麦草茎叶的生物富集系数(0.10~0.33)明显小于根系  $Pb^{2+}$  生物富集系数(0.22~0.63)。随着土壤  $Pb^{2+}$  浓度增大,对照组和 CA 处理组黑麦草的根系和茎叶  $Pb^{2+}$  生物富集系数均持续降低,EDTA 处理组黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  生物

富集系数分别呈现出先降后升和持续下降的变化趋势, $FeCl_3$  处理组黑麦草茎叶和根系对  $Pb^{2+}$  生物富集系数分别呈现出先降后稳定和先降后升的变化趋势。当土壤  $Pb^{2+}$  浓度为 2 000 mg/kg,EDTA 处理组黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  生物富集系数显著大于 CK, $FeCl_3$  处理组黑麦草茎叶和根系  $Pb^{2+}$  生物富集系数显著大于 CK,CA 处理组黑麦草茎叶  $Pb^{2+}$  生物富集



注:不同小写字母表示同一螯合剂不同浓度间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示同一浓度不同螯合剂间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different concentrations of the same chelators ( $P<0.05$ ), different uppercase letters indicate significant difference between different chelators of the same concentration ( $P<0.05$ ).

图4 不同土壤 $Pb^{2+}$ 浓度下黑麦草茎叶与根系 $Pb^{2+}$ 的生物富集系数

Fig.4 Bioconcentration coefficients of  $Pb^{2+}$  in ryegrass stems and leaves and roots under different soil  $Pb^{2+}$  concentrations

系数显著大于CK,此时,EDTA对黑麦草茎叶 $Pb^{2+}$ 生物富集系数和 $FeCl_3$ 对黑麦草根系 $Pb^{2+}$ 生物富集系数相比于对照组分别提高了2.6和2.1倍。

**2.3 不同螯合剂作用下黑麦草对 $Pb^{2+}$ 的转运效果分析** 单因素方差分析结果表明,不同 $Pb^{2+}$ 浓度下的黑麦草茎叶与根系的 $Pb^{2+}$ 浓度呈极显著差异( $P<0.01$ )。不同 $Pb^{2+}$ 浓度下黑麦草根系与茎叶中 $Pb^{2+}$ 浓度的相关性如图5所示,不同 $Pb^{2+}$ 浓度条件下,对照组黑麦草的根系与茎叶中 $Pb^{2+}$ 浓度具有良好的线性关系,此时线性拟合曲线斜率( $k_1$ )为0.313。施加3种螯合剂后,不同 $Pb^{2+}$ 浓度土壤中黑麦草根系与茎叶的 $Pb^{2+}$ 浓度仍然具有良好的线性关系,此时拟合曲线斜率( $k_2$ )为0.567。表明随着3种螯合剂的加入,均可以促进 $Pb^{2+}$ 从植物根部向茎叶部位转移。

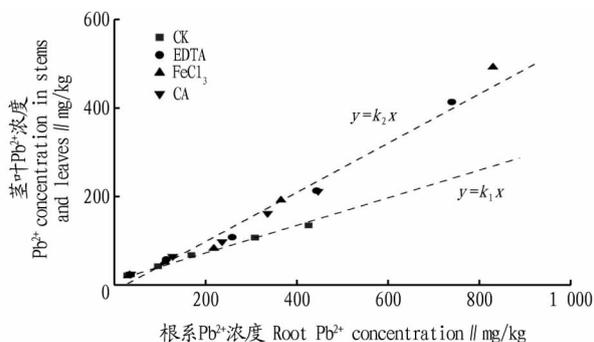


图5 不同 $Pb^{2+}$ 浓度下黑麦草茎叶与根系 $Pb^{2+}$ 浓度关系

Fig.5 Relationship between  $Pb^{2+}$  concentration in ryegrass stem, leaf and roots under different  $Pb^{2+}$  concentrations

为进一步探究不同 $Pb^{2+}$ 浓度下黑麦草 $Pb^{2+}$ 的转运效率,根据公式(3)计算黑麦草 $Pb^{2+}$ 的转运系数,结果如图6所示。随着土壤 $Pb^{2+}$ 浓度增大,对照组黑麦草对 $Pb^{2+}$ 的转运系数逐渐减小,土壤 $Pb^{2+}$ 浓度为2000 mg/kg时,对照组黑麦草的转运系数为0.32。3种螯合剂加入后,黑麦草 $Pb^{2+}$ 转运系数随着土壤 $Pb^{2+}$ 浓度增大出现先减小后增大的趋势,当土壤 $Pb^{2+}$ 浓度为500 mg/kg时,3种螯合剂作用下黑麦草的转运系数均出现最小值,当土壤 $Pb^{2+}$ 浓度达到2000 mg/kg,EDTA、

$FeCl_3$ 和CA作用下黑麦草 $Pb^{2+}$ 的转运系数分别为0.56、0.59和0.48,相比于对照组分别提高了0.75、0.84和0.50倍,此时根系部位富集的 $Pb^{2+}$ 大部分可转运至茎叶部位以供收割。

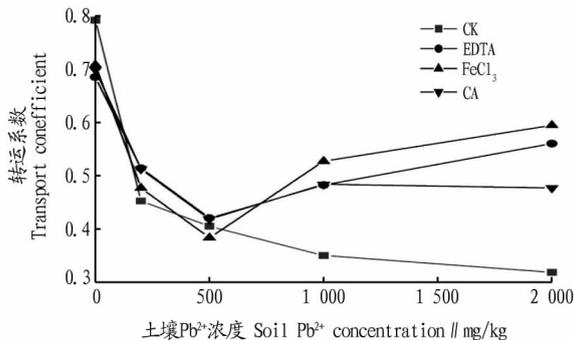


图6 不同螯合剂诱导下黑麦草 $Pb^{2+}$ 的转运系数

Fig.6 Transport coefficients of  $Pb^{2+}$  in ryegrass induced by different chelators

### 3 结论与讨论

研究表明,黑麦草对土壤 $Pb^{2+}$ 有良好的耐受性和富集作用,整体表现为中低浓度( $\leq 500$  mg/kg)促进生长,高浓度( $\geq 1000$  mg/kg)抑制生长。3种螯合剂加入后,黑麦草对土壤 $Pb^{2+}$ 的耐受性和富集作用在一定程度上发生改变,具体表现为低浓度( $<500$  mg/kg)抑制生长,而中高浓度促进生长。当土壤 $Pb^{2+}$ 浓度为2000 mg/kg时, $FeCl_3$ 对黑麦草生长促进作用最为显著,对应黑麦草生物量提高约1倍。推测其原因可能与植物受到环境的影响有关。低浓度 $Pb^{2+}$ 作用能够提高植物叶绿体的酶活动,从而加速叶绿素的合成,促进植物生长。但当土壤内 $Pb^{2+}$ 过高时,会影响植物的呼吸作用和细胞器的正常结构,并抑制根细胞的光合作用和有丝分裂,从而抑制了植物生长<sup>[23]</sup>。

该研究中,黑麦草对 $Pb^{2+}$ 的富集作用规律表现为根系>茎叶,且根系与茎叶中 $Pb^{2+}$ 浓度表现出较好的线性相关关系。黑麦草具有富集重金属 $Pb^{2+}$ 的能力, $Pb^{2+}$ 主要富集于其根部,施加不同类型螯合剂后可显著增强黑麦草对土壤重金属 $Pb^{2+}$ 污染的修复效率<sup>[24]</sup>。3种螯合剂加入均能显著促进

黑麦草对  $Pb^{2+}$  的富集作用,具体表现为低浓度 ( $\leq 200$  mg/kg) 时  $CA > EDTA > FeCl_3$ , 中低浓度 (500 mg/kg) 时  $EDTA > CA > FeCl_3$ , 中高浓度 (1 000 mg/kg) 时  $EDTA > FeCl_3 > CA$ , 高浓度 ( $> 1\ 000$  mg/kg) 时  $FeCl_3 > EDTA > CA$ , 因此,对于受  $Pb^{2+}$  污染程度较高的土壤,选用  $FeCl_3$  诱导黑麦草的方式可对场地  $Pb^{2+}$  浓度起到较好的降低作用。 $EDTA$  对黑麦草修复任何  $Pb^{2+}$  浓度土壤具有较好的提升作用,而  $FeCl_3$  仅对  $Pb^{2+}$  污染程度严重的土壤修复能起到较好的促进作用, $CA$  对黑麦草修复  $Pb^{2+}$  污染程度严重的土壤修复效果影响较小。对于  $Pb^{2+}$  污染程度较高的土壤, $EDTA$  和  $FeCl_3$  诱导作用下可显著提高黑麦草对  $Pb^{2+}$  的富集效率,有利于提升污染场地的植物修复效果。而  $CA$  诱导作用下对于黑麦草修复  $Pb^{2+}$  污染程度较低的土壤提升效果明显。

该研究表明 3 种螯合剂的施加均能促进黑麦草对重金属  $Pb^{2+}$  的富集作用,综合考虑螯合剂适应性及成本, $EDTA$  和  $FeCl_3$  这 2 种螯合剂对于黑麦草修复高浓度  $Pb^{2+}$  污染土具有良好的提升效果,且  $FeCl_3$  效果更为显著。

### 参考文献

- [1] LI X Y, LIU L J, WANG Y G, et al. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 50–58.
- [2] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 366–370.
- [3] 纪文贵, 王珂, 蒙建波, 等. 中国土壤重金属污染状况及其风险评价[J]. *农业研究与应用*, 2020, 33(5): 22–28.
- [4] DUAN Q N, LEE J C, LIU Y S, et al. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: A graphical review[J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2016, 97(3): 303–309.
- [5] 张彩凤. 重金属污染土壤修复方法概述[J]. *绿色科技*, 2018(22): 64–65.
- [6] 缪晓伟. 土壤重金属污染治理与修复方法[J]. *资源节约与环保*, 2020(11): 107–108.
- [7] 王一帆, 栾倩, 蔡蓓, 等. 土壤重金属污染的修复技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(22): 12–17.

(上接第 54 页)

26 份;第 3 类为长果型,共 19 份;第四类为多心室型,共 17 份。

### 参考文献

- [1] 山东农业大学. 蔬菜栽培学各论(北方本)[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [2] 张圣平, 苗晗, 薄凯亮, 等. “十三五”我国黄瓜遗传育种研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021(4): 16–26.
- [3] 曹守军, 李涛, 姚建刚, 等. 烟台地方黄瓜种质资源植物学鉴定及聚类分析[J]. *北方园艺*, 2016(10): 14–18.
- [4] 张红梅, 翟文, 金海军, 等. 利用 InDel 标记分析 23 份黄瓜种质的遗传多样性及核心种质资源筛选[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(4): 28–33.
- [5] 于娅. 榆耳种质资源评价体系建立与有性繁殖系统解析及杂交育种的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [6] 陈林, 曹振强, 梁肇均, 等. 黄瓜种质资源农艺性状多样性分析[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(6): 15–22.
- [7] 徐强, 刘进生, 陈学好, 等. 加工类型黄瓜品质性状的主成分及聚类分析[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 24(4): 78–81.
- [8] 曹齐卫, 李利斌, 孔素萍, 等. 设施黄瓜新育成品种果实外观品质的遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(2): 305–312.
- [9] 于娅, 李艳军, 王飞, 等. 北方地区黄瓜种质资源农艺性状的主成分和聚类分析[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(12): 29–34.
- [10] 李锡香, 朱德蔚. 黄瓜种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

- [8] 黑泽文, 向慧敏, 章家恩, 等. 豆科植物修复土壤重金属污染研究进展[J]. *生态科学*, 2019, 38(3): 218–224.
- [9] 胡梦凌, 曾和平, 董达诚, 等. 腐殖质改良植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 273–280.
- [10] CUNNINGHAM S D, OW D W. Promises and prospects of phytoremediation[J]. *Plant physiology*, 1996, 110(3): 715–719.
- [11] 郭晓宏, 朱广龙, 魏学智. 5 种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 183–186.
- [12] 张胜爽, 张凌云. 铅污染耕地土壤的生物修复技术研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(6): 154–158.
- [13] MEERS E, RUTTENS A, HOPGOOD M, et al. Potential of *Brassic rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(4): 561–572.
- [14] 郭平, 刘畅, 张海波, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 92–95, 113.
- [15] 何宏平. 蒙脱石等粘土矿物与金属离子的作用特征及机理研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1999.
- [16] 王湛. 螯合剂强化植物修复对重金属污染土壤的修复研究进展[J]. *可持续发展*, 2020(4): 634–638.
- [17] 麦笑桃. Cd-Pb 污染土的螯合强化植物修复与重金属渗漏风险研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [18] 章绍康, 弓晓峰, 易佳璐, 等. 多种强化技术联合植物修复重金属污染土壤机制探讨[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(14): 1–6.
- [19] 曹志远, 王开爽, 谢修鸿, 等. 螯合剂不同施用方式下花卉植物修复铅污染土壤的效果[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 286–290.
- [20] 杨明珠, 陈华, 梁语燕, 等.  $EDTA$  强化黑麦草对铅污染土壤的诱导修复效应[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(9): 19–22.
- [21] RAMANA S, BISWAS A K, SINGH A B, et al. Tolerance of ornamental succulent plant crown of thorns (*Euphorbia milli*) to Chromium and its Remediation[J]. *International journal of phytoremediation*, 2015, 17(4): 363–368.
- [22] ZHANG Y P, LI F Z, XU W W, et al. Enhanced phytoextraction for Co-contaminated soil with Cd and Pb by ryegrass (*Lolium perenne* L.)[J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2019, 103(1): 147–154.
- [23] ALABOUDI K A, AHMED B, BRODIE G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant[J]. *Annals of agricultural sciences*, 2018, 63(1): 123–127.
- [24] 敬路准, 陈晓明, 肖伟, 等. 黑麦草修复重金属污染土壤与废水及富集植物的微生物降解[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(6): 1449–1456.

- [11] 赵晓玲. 11 个黄瓜品种的主要农艺性状及聚类分析[J]. *甘肃农业科技*, 2009(10): 33–35.
- [12] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 727–734.
- [13] 许有诚, 赵庄, 卢日刚, 等. 主成分分析在中药质量分析及质量评价中的应用进展[J]. *大众科技*, 2021, 23(8): 37–41.
- [14] 逢洪波, 郑晓明, 李玥莹, 等. 一种基于主成分分析对水稻苗耐寒性的评价方法: CN202011588556.9[P]. 2021–04–09.
- [15] 王晓敏, 刘佩君, 郑福顺, 等. 宁夏露地夏茬大果番茄杂交组合的综合评价[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(1): 160–170.
- [16] 孙耀中, 东方阳, 陈受宜, 等. 氯化钠胁迫下转 BADH 基因水稻农艺性状的主成分及聚类分析[J]. *中国农学通报*, 2003, 19(3): 23–25, 31.
- [17] 闫世江, 张继宁, 刘洁. 聚类分析在黄瓜育种中的应用[J]. *当代生态农业*, 2012, 21(Z1): 9–12.
- [18] 李超, 杨英, 陈伟, 等. 西州密系甜瓜 SSR 指纹图谱构建及聚类分析[J]. *园艺学报*, 2022, 49(3): 622–632.
- [19] 陈观杰, 郑晓峰, 冯乃杰, 等. 雷州半岛地区大豆农艺性状因子和聚类分析[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(3): 485–491, 523.
- [20] 肖瑜, 牛国保, 单晓政, 等. 花椰菜农艺性状相关性、主成分及聚类分析[J/O]. *分子植物育种*, 2021–11–01[2022–02–07]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211101.0931.004.html>.
- [21] 董灵艳, 张洪勇, 袁海涛, 等. 山东省转基因棉花品种数量性状遗传多样性分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13): 86–88.
- [22] 刘卫星, 张枫叶, 贺群岭, 等. 我国北方花生品种产量品质性状的综合评价及聚类分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(12): 103–106.