

DOI: 10.11766/trxb201612130539

## 直流电场与添加剂强化东南景天修复镉污染土壤\*

肖文丹<sup>1</sup> 叶雪珠<sup>1†</sup> 徐海舟<sup>2</sup> 姚桂华<sup>2</sup> 王京文<sup>3</sup> 李丹<sup>3</sup> 张棋<sup>1</sup>  
胡静<sup>1</sup> 高娜<sup>1</sup>

(1 浙江省农业科学院农产品质量标准研究所, 浙江省植物有害生物防控重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 杭州 310021)

(2 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江临安 311300)

(3 杭州市植保土肥总站, 杭州 310020)

**摘要** 通过盆栽试验, 研究交换直流电场(电压梯度 $1.0 \text{ V cm}^{-1}$ 、通电时间 $6 \text{ h d}^{-1}$ )和添加剂( $15 \text{ g kg}^{-1}$  猪粪堆肥、 $10 \text{ g kg}^{-1}$  腐殖酸肥或 $5 \text{ mmol kg}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠(EDTA))对超积累植物——东南景天修复镉污染土壤的影响。结果表明, 施加直流电场和添加剂均显著( $p < 0.05$ )提高土壤有效态镉含量, 促进东南景天对镉的吸收转运。在电场作用下, 东南景天地上部镉含量提高 $26.6\% \sim 47.5\%$ ; 在添加剂(猪粪堆肥、腐殖酸肥、EDTA)作用下, 东南景天地上部镉含量分别提高 $22.9\% \sim 33.1\%$ 、 $14.3\% \sim 29.4\%$ 和 $6.1\% \sim 12.0\%$ 。双向切换电场方向能有效控制土壤 pH 的剧烈变化, 施加直流电场对东南景天地上部生物量无显著影响。施加 $15 \text{ g kg}^{-1}$  猪粪堆肥和 $10 \text{ g kg}^{-1}$  腐殖酸肥显著提高东南景天地上部生物量, 增幅分别为 $40.3\% \sim 43.7\%$ 和 $16.3\% \sim 18.2\%$ , 但是, 添加 $5 \text{ mmol kg}^{-1}$  EDTA却显著抑制东南景天的生长, 东南景天地上部生物量减少 $7.3\% \sim 7.5\%$ 。综合东南景天地上部镉含量和生物量, 在猪粪堆肥—交换直流电场和腐殖酸肥—交换直流电场的联合作用下, 东南景天地上部镉积累量分别提高了 $135\%$ 和 $100\%$ , 因此, 猪粪堆肥和腐殖酸肥联合交换直流电场可显著促进东南景天对镉的吸收积累, 提高东南景天修复镉污染土壤的效率。

**关键词** 镉; 植物修复; 电动修复; 东南景天; 有机添加剂

**中图分类号** X53 **文献标识码** A

随着工矿业的发展, 矿业冶炼、工业废水及废弃物排放、含镉电镀材料的生产和使用导致土壤镉污染问题日益严重<sup>[1]</sup>。2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国镉超标土壤已达 $7.0\%$ , 镉已成为环境中一种重要的重金属污染物。近年来, 学术界已提出了多种方法治理镉污染土壤, 如物理修复、化学修复、生物修复以及多措施联合修复等<sup>[2]</sup>。与传统

的理化方法相比, 植物修复技术因其治理过程的原位性、成本的低廉性以及操作的简易性而受到人们的重视<sup>[2]</sup>。其中, 利用超积累植物来修复重金属污染土壤已成为土壤修复研究的热点之一<sup>[3-4]</sup>。东南景天(*Sedum alfredii Hance*)是一种典型的镉超积累植物, 具有耐受和积累高浓度镉的能力, 并具有生物量大、生长速度快、易无性繁殖、多年生等特点, 是理想的植物修复材料<sup>[5]</sup>。然而, 受重

\* 杭州市科技发展计划项目(20150533B13)和浙江省重大科技专项(2015C02042)资助 Supported by the Hangzhou Science and Technology Development Program (No. 20150533B13) and Major Special Sci-Tech Project of Zhejiang Province of China (No. 2015C02042)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xuezhuye@aliyun.com

作者简介: 肖文丹(1987—), 女, 湖南永州人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境修复研究。E-mail: wendanxiao@aliyun.com

收稿日期: 2016-12-13; 收到修改稿日期: 2017-01-21; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-03-15

金属生物有效性等环境因素影响,单独使用植物修复技术往往难以持续地保持修复效率<sup>[6-7]</sup>。因此,需要与其他土壤修复技术(如化学修复、电动修复等)相结合共同提高污染土壤的修复效率。

近年来,植物修复技术与其他土壤修复技术(如化学修复、电动修复等)联用修复污染土壤已逐步成为一个新的发展趋势<sup>[8-10]</sup>。将超积累植物与直流电场联用,通过在污染土壤两侧施加直流电压形成电场梯度,加快土壤颗粒表面重金属的解吸,提高土壤溶液中重金属浓度,促进植物对重金属的吸收和积累,从而达到修复污染土壤的目的<sup>[11]</sup>。但是,由于正、负极上的电极反应会导致电极附近的土壤偏酸或偏碱,不利于植物生长,而采取双向切换电场方向可以很好地解决这个问题。相对于单向电场,交换电场能有效控制土壤pH的剧烈变化,同时在交换电场的作用下,土壤中的重金属易聚集于土壤中部,有利于植物对重金属的吸收<sup>[11]</sup>。Pazos等<sup>[12]</sup>利用水平交换直流电场处理受锰污染的高岭土,发现水平交换电场可显著提高锰的去除率。仓龙等<sup>[11]</sup>采用盆栽试验,研究了水平交换电场和乙二胺二琥珀酸(EDDS)对黑麦草吸收Cu/Zn的影响,结果表明,电场处理对黑麦草地上部的生长具有促进作用,并且在交换电场和EDDS的联合作用下,Cu/Zn易聚集于土壤中部,促进植物对Cu/Zn的吸收。因此,将水平交换电场与植物修复组合使用可能成为一种有效的修复方法。

同时,采取强化措施,如施用有机肥、金属螯合剂等也可提高植物修复的效率。有机肥施入土壤后不仅可以改良土壤性质、提高土壤肥力,而且在矿化分解过程中产生的小分子有机酸还可以活化土壤重金属,提高其生物有效性,促进植物吸收<sup>[13]</sup>。螯合剂能与重金属发生螯合反应,生成可溶性的螯合物,提高重金属离子在土壤中的迁移能力<sup>[14]</sup>。潘逸和周立祥<sup>[15]</sup>研究发现耕层土壤交换性镉和铜含量在施用有机肥后明显增加,促进了小麦对镉和铜的吸收与积累。Wei等<sup>[16]</sup>利用超富集植物球果蕓菜(*Rorippa globosa* (Turcz.) Thell)修复镉污染土壤,发现施用鸡粪可显著提高球果蕓菜对镉的提取能力。魏明宝等<sup>[17]</sup>研究络合剂乙二胺四乙酸二钠(EDTA)和木醋液对印度芥菜(*Brassica juncea*)修复重金属污染土壤的影响,发现EDTA和木醋液均能显著提高印度芥菜对铜、锌和镉的修复效率。目前,将添加剂用于辅助植物

修复重金属污染土壤已成为新的趋势,但不同类型添加剂对植物修复重金属的影响往往不同,或提高<sup>[18-19]</sup>或降低<sup>[10]</sup>,因此,需要研究不同添加剂对植物生长以及吸收积累重金属的影响,筛选出有效的、环境友好的添加剂。

本文以某电镀厂周边镉污染土壤为研究对象,采用交换直流电场—超积累植物东南景天联合修复技术,辅以猪粪堆肥、腐殖酸肥、EDTA等添加剂,研究交换直流电场与添加剂联合作用对东南景天吸收、富集镉的影响,考察交换直流电场与植物修复组合技术的可行性,为进一步深入研究和发植物—电动联合修复技术提供试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物东南景天由浙江农林大学提供,是一种多年生、可通过扦插进行无性繁殖的镉/锌超积累植物。植株取自浙江省衢州市一古老铅锌矿,经浙江农林大学试验基地人工繁殖培育后,选用大小均匀、去顶芽、带叶片和高约5 cm的植株作为供试材料。供试土壤为青紫泥(潜育水耕人为土),采自富阳市常安镇某一电镀厂附近,基本性质见表1,所取土壤皆为0~20 cm的表层土壤,风干后过5 mm筛备用。

试验所用的猪粪堆肥为慈溪市中慈生态肥料有限公司按生物发酵法堆制;腐殖酸肥为葛林美(苏州)农业科技有限公司生产;EDTA(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司。猪粪堆肥和腐殖酸肥的基本性质如表2所示。

土壤样品及植物样品中重金属有效态和全量测定均采用优级纯(GR)试剂,其他常规指标测定均采用分析纯(AR)试剂。

### 1.2 盆栽试验

于2015年9月至2015年12月在浙江省农业科学院的玻璃温室进行盆栽试验。试验设计通电和不通电2个条件,根据预试验结果,选择电压梯度 $1.0 \text{ V cm}^{-1}$ 、通电时间 $6 \text{ h d}^{-1}$ 作为电场条件。通电和不通电条件下均设置4个处理,分别为:①CK(无添加剂);②添加猪粪堆肥;③添加腐殖酸肥;④添加EDTA,每个处理设3个重复。猪粪堆肥、腐殖酸肥、EDTA分别按照 $15 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $10 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $5 \text{ mmol kg}^{-1}$ 剂量添加,添加剂与土壤充分混匀后

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil used in this study

土壤 Soil	pH	有机质 <sup>②</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 <sup>③</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	电导率 <sup>④</sup> ( $\mu$ S cm <sup>-1</sup> )	全镉 <sup>⑤</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	有效态镉 <sup>⑥</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
潜育水耕人为土 <sup>①</sup>	7.78 $\pm$ 0.05	21.40 $\pm$ 0.35	18.20 $\pm$ 0.03	562.00 $\pm$ 2.02	31.70 $\pm$ 0.81	12.10 $\pm$ 0.21

①Gleyic-Stagnic Anthrosols; ②Organic matter; ③Cation exchange capacity; ④Electrical conductivity; ⑤Total Cd; ⑥Available Cd

表2 供试有机肥(猪粪堆肥和腐殖酸肥)基本性状

Table 2 Basic properties of organic manures (pig manure compost and humic acid) used

有机肥 Organic manure	pH	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	电导率 Electrical conductivity (mS cm <sup>-1</sup> )	全镉 Total Cd (mg kg <sup>-1</sup> )
猪粪堆肥 Pig manure	7.68	294	52.3	102.0	61.2	3.65	0.783
腐殖酸肥 Humic acid fertilizer	5.25	174	111.0	82.4	85.4	1.08	0.252

装盆(305 mm  $\times$  210 mm  $\times$  110 mm), 每盆装土 4 kg。同时在每盆中加入尿素 1.84 g、磷酸二氢钾 1.58 g、硫酸钾 0.35 g 作为基肥。土壤平衡 1 w 后, 选择生长一致的东南景天苗株移栽入盆中, 2 w 后待东南景天生长恢复, 将高纯石墨电极片(长 200 mm  $\times$  宽 100 mm  $\times$  厚 5 mm) 插入塑料盆的两侧作为电极板, 并用导线接入直流稳压器开始通电。在植物生长过程中定期浇水使土壤含水量保持田间持水量 70%, 并每天切换电场方向。通电 2 个月后, 收获所有处理植物。同时将盆栽土壤从阳极到阴极切成 5 部分, 每部分长度为 6 cm, 分别标记为 S1、S2、S3、S4 和 S5, 测定每部分土壤的 pH 和有效态镉含量。

### 1.3 样品处理与测定

植物样品采集后, 先用自来水仔细清洗再用去离子水清洗, 将植物样品分为根部和地上部两部分。然后置于烘箱中 110  $^{\circ}$ C 杀青 10 min, 再于 65  $^{\circ}$ C 烘干至恒重, 记录干物质重。烘干样品用球磨仪(Retsch RS-100 型, 德国)磨成粉末状(< 0.25 mm), 并存放于干燥器中待分析。采集的土样经风干、磨细, 用于测定土壤 pH 的样品过 10 目筛, 用于测定土壤重金属含量的样品过 100 目筛。

植物镉含量测定: 称取约 0.2 g 植物样品利用美国 LabTech ED 36 智能电热消解仪消解, 加 5 ml HNO<sub>3</sub> + 1 ml HClO<sub>4</sub> 于密闭的聚四氟乙烯罐中 160  $^{\circ}$ C 消煮 6 h。消煮液转移, 用超纯水定容至 50 ml, 采

用电感耦合等离子发射光谱仪 ICP-OES (Varian 710-ES ICP, 美国) 测定植株镉含量。用国家标准物质 GBW10016 控制分析质量, 按照上述方法对 GBW10016 进行检测, 将其检测结果与标准值进行比较, 测量值在标准值范围内。

土壤 pH (土/水=1:2.5) 采用电极法测定。土壤镉含量测定: 镉全量和有效态含量分别采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF (5:1:1) 消煮和二乙基三胺五乙酸 (DTPA) 试剂提取, 最后所得消煮液和浸提液均用 ICP-OES (Varian 710-ES ICP, 美国) 测定。镉全量和有效态含量测定分别用国家标准物质 GBW07405 和 GBW07412 控制分析质量, 按照上述方法对 GBW07405 和 GBW07412 进行检测, 将其检测结果与标准值进行比较, 测量值均在标准值范围内。

### 1.4 数据分析

所有数据均为 3 次重复的平均值, 采用 SPSS 18.0 进行标准差分析和差异显著性检验。采用 LSD 法(最小显著性差异)进行  $p < 0.05$  水平下的显著性检验。

## 2 结果与讨论

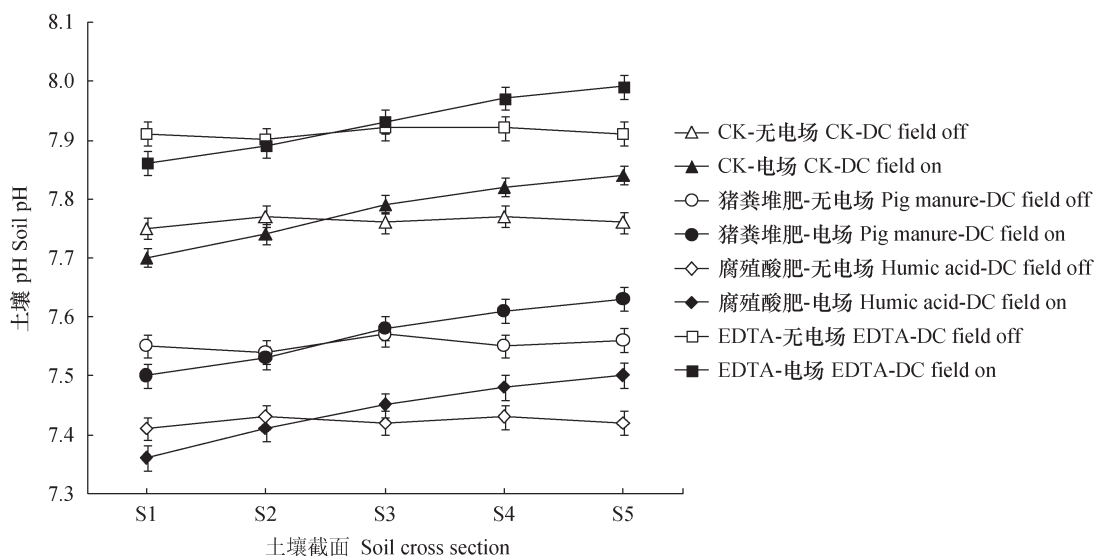
### 2.1 添加剂和电场对土壤 pH 的影响

在直流电场作用下, 由于电解水反应, 会造成靠近阳极的土壤 pH 降低和靠近阴极的土壤 pH 升高, 而双向切换电场方向的运行方式能有效控制土

壤 pH 的变化<sup>[20]</sup>。由图1可知,在通电2个月内,保持每天交换电场方向,土壤各截面pH分布比较均匀,靠近阳极的S1区域土壤pH与不通电土壤相比,仅降低0.05个单位,靠近阴极的S5区域土壤pH仅升高0.04个单位。

由图1可知,EDTA、腐殖酸肥和猪粪堆肥均显著影响土壤pH分布。与对照(CK)相比,EDTA处理土壤pH升高了0.13~0.16个单位,这主

要与EDTA溶液较高的pH有关<sup>[21]</sup>;而腐殖酸肥和猪粪堆肥处理土壤pH分别降低了0.32~0.34和0.19~0.23个单位,达到显著性差异( $p < 0.05$ )。Evangelou等<sup>[22]</sup>研究也发现在腐殖酸肥添加后,土壤pH由7.2降至6.6。此外,李荣华等<sup>[23]</sup>也发现受猪粪堆肥影响,土壤pH由8.46降至7.44。Vuorinen和Saharinen<sup>[24]</sup>指出猪粪添加导致土壤pH降低的主要原因是其成分中所含的有机酸。



注: S1、S2、S3、S4、S5分别代表距阳极0~6 cm、6~12 cm、12~18 cm、18~24 cm、24~30 cm土壤; DC field代表直流电场。  
下同 Note: S1, S2, S3, S4 and S5 stands for distance 0-6 cm, 6-12 cm, 12-18 cm, 18-24 cm and 24-30 cm from anode; and DC field means direct current electrical field. The same below

图1 不同处理对土壤各截面pH的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil pH distribution

## 2.2 添加剂和电场对土壤镉有效态的影响

土壤重金属生物有效性是影响植物对重金属修复效率的重要因素<sup>[25]</sup>。如图2所示,直流电场和添加剂(猪粪堆肥、腐殖酸肥和EDTA)均显著地( $p < 0.05$ )影响土壤有效态镉(DTPA提取态)浓度。在交换直流电场作用下,土壤有效态镉提高了6.06%~15.64%,并且主要集中在S3区域。Hanssan等<sup>[26]</sup>研究也发现,受交换电场方向影响,土壤有效态镉主要集中在土壤中部,将有利于植物对重金属的吸收。Sanz等<sup>[25]</sup>指出,在直流电场作用下,电解水产生的 $H^+$ 从阳极向阴极迁移过程中,会加快土壤颗粒上镉离子的解吸,提高土壤有效态镉的含量。胡宏韬和程金平<sup>[27]</sup>也报道,镉在土壤中主要以阳离子形式存在,在电场作用下较易

从土壤颗粒上解吸附并进入土壤溶液。

在通电条件下,施加猪粪堆肥、腐殖酸肥和EDTA后,土壤有效态镉浓度分别较对照提高了5.74%~7.16%、8.80%~10.32%和4.77%~5.91%;在不通电条件下,相应的增幅分别为2.84%~3.32%、7.70%~9.47%和7.10%~7.75%,其中,以腐殖酸肥处理的增幅最大。这可能与腐殖酸肥导致土壤pH降低有关,土壤pH降低可以促进土壤颗粒表面镉的释放,进而提高有效态镉的浓度<sup>[22]</sup>。此外,络合剂EDTA主要以 $HL^{3-}$ 的形式存在,在电场力作用下,从阴极向阳极迁移过程中也可以加快土壤颗粒上镉离子的解吸<sup>[14]</sup>。姚桂华等<sup>[8]</sup>指出,猪粪堆肥分解产生小分子有机酸可以活化被土壤胶体吸附的镉,从而增加了土壤溶液中

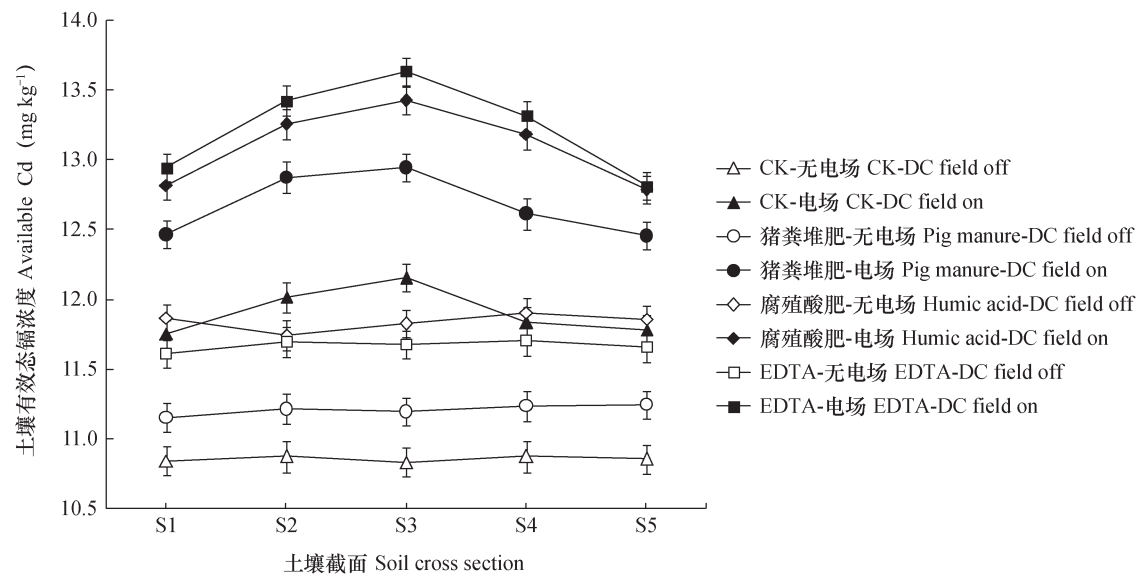


图2 不同处理对土壤镉有效态的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil Cd availability

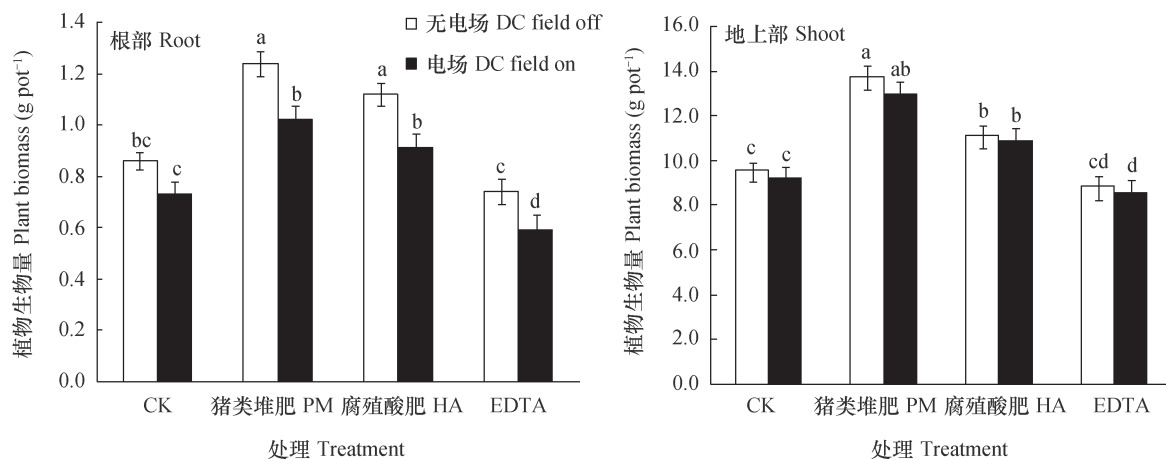
镉离子的含量。但是, Shahid等<sup>[28]</sup>研究发现,在碱性土壤中施加有机肥能提高土壤中有效态重金属的含量,但是在酸性土壤中施加有机肥则可能导致土壤中有效态重金属含量降低。

### 2.3 添加剂和电场对东南景天生物量的影响

由图3A可知,与对照相比,在施加直流电场后景天根部生物量降低15.1%~20.3%,达到显著性( $p < 0.05$ )差异。正如Luo等<sup>[29]</sup>研究发现直流电场的施用导致土壤中硝酸盐转化为亚硝酸盐,影响根系的生长,导致根部生物量减少。而景天地上部生物量在施加直流电场后,仅降低

1.89%~5.75%,未达到显著性( $p > 0.05$ )差异(图3B)。徐海舟<sup>[30]</sup>研究表明,交换电场方向可以减少直流电场对土壤酸碱度的影响,一定程度上缓解了直流电场对植物地上部生长的抑制作用。Chirakkara等<sup>[31]</sup>研究也发现,施用交换直流电场对植物地上部生物量并无显著影响。

添加猪粪堆肥、腐殖酸肥和EDTA均显著( $p < 0.05$ )影响了东南景天根部和地上部生物量(图3)。与对照相比,猪粪堆肥和腐殖酸肥显著增加了东南景天的生物量,根部增幅分别为39.7%~44.2%和24.7%~30.2%,地上部增幅分



注: PM代表Pig manure, HA代表Humic acid; 图中不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ ) Note: PM refers to pig manure and HA refers to humic acid; Different letters in the figure mean significant difference between treatments at the 0.05 probability level

图3 不同处理对东南景天生物量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on biomass of *Sedum alfredii*

别为40.3%~43.7%和16.3%~18.2%。但是,添加EDTA却显著抑制东南景天的生长,东南景天根部和地上部生物量分别减少了14.0%~19.2%和7.26%~7.53%,可能是由于EDTA活化的重金属对景天生长有一定抑制作用。由此可见,猪粪堆肥和腐殖酸肥的施用,特别是猪粪堆肥的施用,有利于改善东南景天的营养条件。邹晓霞等<sup>[32]</sup>研究发现,猪粪富含蛋白质、有机酸、纤维素、半纤维素以及无机盐等营养,并且碳氮比例较小,容易被微生物分解,能够释放出可为作物吸收利用的养分。

#### 2.4 添加剂和电场对东南景天镉含量的影响

在电场作用下,东南景天根部和地上部镉含量均显著( $p < 0.05$ )提高(图4)。在无电场条件下,根部和地上部镉含量分别为53.7~76.8 mg kg<sup>-1</sup>和178.7~212.6 mg kg<sup>-1</sup>;在电场条件下,根部和地上部镉含量显著提高,分别为62.4~89.9 mg kg<sup>-1</sup>和226.2~313.7 mg kg<sup>-1</sup>。此外,如表3所示,在电场条件下,CK、猪粪堆肥、腐殖酸肥和EDTA处理下的镉转移系数(植株地上部镉含量与根部镉含量比值)由3.10、2.50、2.85、3.53分别提高至3.29、3.45、3.75、4.06。

添加猪粪堆肥、腐殖酸肥和EDTA均显著( $p$

$< 0.05$ )影响了东南景天镉含量(图4)。与对照相比,猪粪堆肥和腐殖酸肥处理下东南景天根部镉含量分别提高了22.9%~33.1%和14.3%~29.4%,地上部镉含量提高了7.33%~37.0%和19.0%~38.7%;而EDTA处理下东南景天根部镉含量降低了6.99%~14.80%,地上部镉含量反而提高了6.13%~12.01%。结合转移系数结果(表3),EDTA处理下镉转移系数是对照的1.14倍~1.31倍,EDTA能显著提高镉由根部向地上部的转运能力。因此,EDTA处理下东南景天根部镉含量降低主要是由于镉向地上部的转运能力提高。

本试验中,有机肥+电场处理下东南景天地上部镉含量最高,腐殖酸肥+电场处理和EDTA+电场处理次之。近年来许多研究也表明,直流电场和土壤添加剂能够促进土壤颗粒表面镉离子的解吸,提高土壤溶液中镉的浓度<sup>[20, 33]</sup>,并加速镉向植物木质部的转运<sup>[11, 25]</sup>。有机肥和腐殖酸肥促进植物镉吸收,可能与土壤pH降低有关,土壤pH的降低可以提高土壤中有效态镉的含量<sup>[34]</sup>。另一种可能性是,微生物分解有机肥和腐殖酸肥产生的小分子有机物与重金属镉发生络合作用,而易被植物吸收<sup>[15, 35]</sup>。

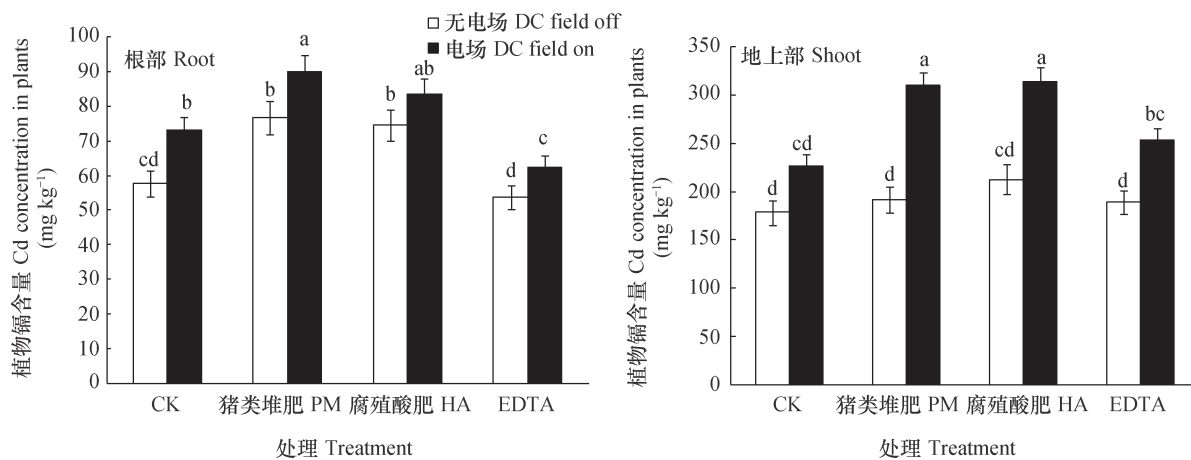


图4 不同处理对东南景天镉含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on Cd concentrations in *Sedum alfredii*

#### 2.5 添加剂和电场对东南景天地上部镉积累量的影响

在评价东南景天对镉污染土壤修复效率时,主要考虑东南景天从土壤中带走的镉总量,即东南景天地上部镉积累量。这主要涉及以下两个因素:植株地上部生物量和地上部镉浓度,两者的乘积代表地上部镉积累量。如图5所示,由于施加直

流电场对东南景天地上部生物量无显著影响,却显著提高了东南景天地上部镉浓度,因此,在直流电场作用下,东南景天地上部镉积累量得到显著( $p < 0.05$ )提高。在无电场条件下,景天地上部镉积累量为1 676~2 635  $\mu\text{g pot}^{-1}$ ,在电场条件下,地上部镉积累量显著提高,为2 088~4 014  $\mu\text{g}$

表3 东南景天对镉转移系数

Table 3 Translocation factor of Cd from roots to shoots in *Sedum alfredii*

	无电场 DC field off	电场 DC field on
CK	3.10 ± 0.11 c	3.29 ± 0.09 bc
猪粪堆肥 Pig manure	2.50 ± 0.08 d	3.45 ± 0.13 bc
腐殖酸肥 Humic acid	2.85 ± 0.09 cd	3.75 ± 0.13 ab
EDTA	3.53 ± 0.12 b	4.06 ± 0.11 a

注：转移系数=地上部镉含量/根部镉含量；表中不同字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Translocation factor = Cd concentration in shoot / Cd concentration in root; Different letters in the table mean significant difference between treatments at the 0.05 probability level

pot<sup>-1</sup>，增幅高达22.2%~52.3%。Lim等<sup>[36]</sup>研究发现，施加电场显著提高了印度芥菜对重金属的修复效率。Tahmasbian和Sinegani<sup>[20]</sup>指出，在电场作用下植物膜的渗透性会提高，有利于金属离子跨过植物膜进入植物体内。Sanz等<sup>[25]</sup>也发现，在电场作用下油菜 (*Brassica napus*) 和烟草 (*Nicotiana tabacum*) 对镉的吸收和富集能力显著提高。

本试验中，猪粪堆肥和腐殖酸肥的施入显著 ( $p < 0.05$ ) 提高东南景天地上部镉积累量 (图5)。与对照相比，猪粪堆肥和腐殖酸肥处理下东南景天地上部镉积累量分别提高了54.3%~92.2%和38.4%~63.9%。猪粪堆肥和腐殖酸肥促进东南景天地上部镉积累，与它们对东南景天生长的促进作用以及矿化分解产生的小分子有机物对土壤镉的活化作用等有关<sup>[7]</sup>。Sinegani和Khalilikhah<sup>[37]</sup>也报道，施加粪肥能够显著提高植物向日葵 (*H. annuus*) 对镉的吸收富集能力。Sung等<sup>[38]</sup>发现，施加腐殖酸能够提高土壤有效态镉含量以及芦苇

(*Phragmites communis*) 对镉的吸收积累。

但是，与对照相比，EDTA处理下东南景天地上部镉积累量在电场条件下，仅提高了3.88%，在无电场条件下，反而减少了1.85%，均未达到显著性差异 ( $p > 0.05$ )。EDTA未显著提高东南景天地上部镉积累量主要归因于其对东南景天生长的抑制作用。李玉双等<sup>[39]</sup>探讨利用白菜修复污灌区重金属污染土壤，并研究EDTA对白菜生长状况及其富集重金属的影响，发现高浓度EDTA的施用抑制白菜的生长，降低了其地上部的生物量，导致植物提取效率降低。刘晓娜<sup>[40]</sup>也指出，EDTA的施用抑制植物的生长，影响植物对重金属的修复效率。

在猪粪堆肥—交换直流电场、腐殖酸肥—交换直流电场、EDTA—交换直流电场的联合作用下，东南景天地上部镉积累量分别提高了135%、100%和27%，可见，猪粪堆肥和腐殖酸肥联合交换直流电场可以显著促进东南景天对镉的吸收积累，提高东南景天对镉污染土壤的修复效率。

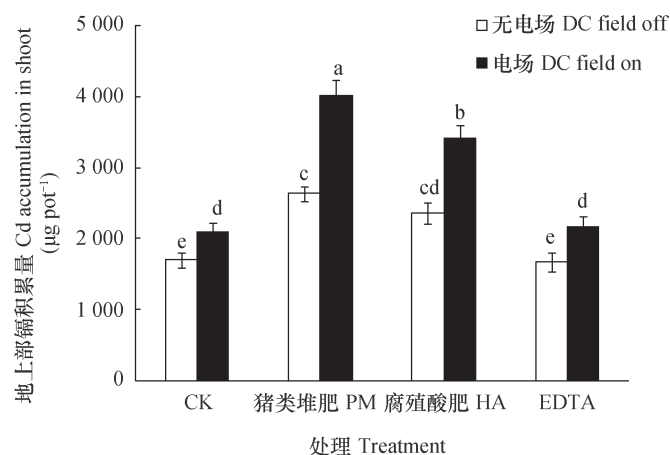


图5 不同处理对东南景天镉积累量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on Cd accumulation in *Sedum alfredii*

### 3 结 论

施加直流电场和添加剂（猪粪堆肥、腐殖酸肥或EDTA）均显著提高土壤有效态镉含量，促进东南景天对镉的吸收转运，并且，施加猪粪堆肥和腐殖酸肥还显著提高东南景天地上部生物量。在猪粪堆肥—交换直流电场、腐殖酸肥—交换直流电场或EDTA—交换直流电场的联合作用下，东南景天地上部镉积累量分别提高了135%、100%、27%。因此，猪粪堆肥或腐殖酸肥联合交换直流电场可显著提高东南景天对镉污染土壤的修复效率。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Murakami M, Nakagawa F, Ae N, et al. Phytoextraction by rice capable of accumulating cd at high levels: Reduction of Cd content of rice grain. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 ( 15 ) : 5878—5883
- [ 2 ] Salt D E, Smith R D, Raskin I. *Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49: 643—668
- [ 3 ] 安婧, 宫晓双, 魏树和. 重金属污染土壤超积累植物修复关键技术的发展. *生态学杂志*, 2015, 34 ( 11 ) : 3261—3270
- An J, Gong X S, Wei S H. Research progress on technologies of phytoremediation of heavy metal contaminated soils ( In Chinese ). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 ( 11 ) : 3261—3270
- [ 4 ] 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. *环境科学*, 2015, 36 ( 5 ) : 1864—1869
- Wei Z B, Chen X H, Wu Q T, et al. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils using *Sedum alfredii* Hance with biodegradable chelate GLDA ( In Chinese ). *Environmental Science*, 2015, 36 ( 5 ) : 1864—1869
- [ 5 ] Li W C, Ye Z H, Wong M H. Effects of bacteria an enhanced metal uptake of the Cd/Zn-hyperaccumulating plant, *Sedum alfredii*. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58 ( 15/16 ) : 4173—4182
- [ 6 ] 石旻飞, 李晔, 袁江, 等. 螯合剂与表面活性剂强化东南景天修复Cd污染土壤的研究. *安徽农业科学*, 2015, 43 ( 20 ) : 99—102
- Shi M F, Li Y, Yuan J, et al. Study on chelator/surfactant-enhanced remediation of Cd-contaminated soil by *Sedum alfredii* Hance ( In Chinese ). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43 ( 20 ) : 99—102
- [ 7 ] Li W C, Ye Z H, Wong M H. Metal mobilization and production of short-chain organic acids by rhizosphere bacteria associated with a Cd/Zn hyperaccumulating plant, *Sedum alfredii*. *Plant and Soil*, 2010, 326 ( 1/2 ) : 453—467
- [ 8 ] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响. *环境科学*, 2015, 36 ( 11 ) : 4268—4276
- Yao G H, Xu H Z, Zhu L G, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by *Sedum alfredii* Hance ( In Chinese ). *Environmental Science*, 2015, 36 ( 11 ) : 4268—4276
- [ 9 ] Li J H, Sun Y Y, Yin Y, et al. Ethyl lactate-EDTA composite system enhances the remediation of the cadmium-contaminated soil by autochthonous willow (*Salix x aureo-pendula* CL 'J1011') in the lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181 ( 1/3 ) : 673—678
- [ 10 ] Evangelou M W H, Bauer U, Ebel M, et al. The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere*, 2007, 68 ( 2 ) : 345—353
- [ 11 ] 仓龙, 周东美, 吴丹亚. 水平交换电场与EDDS螯合诱导植物联合修复Cu/Zn污染土壤. *土壤学报*, 2009, 46 ( 4 ) : 729—735
- Cang L, Zhou D M, Wu D Y. Effects of horizontal exchange electric field and EDDS application on ryegrass uptake of copper/zinc and soil characteristics ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 ( 4 ) : 729—735
- [ 12 ] Pazos M, Sanromán M A, Gimeselle C. Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity exchange technique. *Chemosphere*, 2006, 62 ( 5 ) : 817—822
- [ 13 ] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验. *环境科学学报*, 2004, 24 ( 5 ) : 858—864
- Wang G M, Zhou L X, Zhan X H, et al. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on metal availability in paddy soil: Field micro-plot trials ( In Chinese ). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24 ( 5 ) : 858—864
- [ 14 ] 方一丰, 郑余阳, 唐娜, 等. EDTA强化电动修复土壤铅污染. *农业环境科学学报*, 2008, 27 ( 2 ) : 612—616
- Fang Y F, Zheng Y Y, Tang N, et al. EDTA enhanced



- electroremediation of lead-contaminated soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27 (2): 612—616
- [15] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中Cu、Cd形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验. *南京农业大学学报*, 2007, 30 (2): 142—146  
Pan Y, Zhou L X. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake: Field micro-plot trials (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30 (2): 142—146
- [16] Wei S, Zhu J, Zhou Q X, et al. Fertilizer amendment for improving the phytoextraction of cadmium by a hyperaccumulator *Rorippa globosa* (Turcz.) Thell. *Journal of Soils & Sediments*, 2011, 11 (6): 915—922
- [17] 魏明宝, 胡波, 郝法政, 等. 络合剂对转基因印度芥菜修复重金属污染土壤的影响. *河南农业科学*, 2011, 40 (6): 82—84  
Wei M B, Hu B, Hao F Z, et al. Effect of various chelators on remediation of heavy metal-polluted soil with transgenic Indian mustard (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40 (6): 82—84
- [18] 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对红壤Cu和Cd含量及活化率的影响. *生态环境学报*, 2009, 18 (3): 914—919  
Liu J, Lü J L, Xu M G, et al. Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2009, 18 (3): 914—919
- [19] 徐明岗, 张青, 曾希柏. 改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究. *环境科学*, 2007, 28 (6): 1361—1366  
Xu M G, Zhang Q, Zeng X B. Effects and mechanism of amendments on remediation of Cd-Zn contaminated paddy soil (In Chinese). *Environmental Science*, 2007, 28 (6): 1361—1366
- [20] Tahmasbian I, Sinegani A A S. Improving the efficiency of phytoremediation using electrically charged plant and chelating agents. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23 (3): 2479—2486
- [21] 樊广萍, 朱海燕, 郝秀珍, 等. 不同的增强试剂对重金属污染场地土壤的电动修复影响. *中国环境科学*, 2015, 35 (5): 1458—1465  
Fan G P, Zhu H Y, Hao X Z, et al. Electrokinetic remediation of an electroplating contaminated soil with different enhancing electrolytes (In Chinese). *China Environmental Science*, 2015, 35 (5): 1458—1465
- [22] Evangelou M W H, Daghan H, Schaeffer A. The influence of humic acids on the phytoextraction of cadmium from soil. *Chemosphere*, 2004, 57 (3): 207—213
- [23] 李荣华, 孙西宁, 刁展, 等. 猪粪好氧堆肥对缺锌土壤种植大豆的影响研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (7): 1343—1349  
Li R H, Sun X N, Diao Z, et al. Influence of swine compost application on the soybean planting and its environmental risk assessment (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (7): 1343—1349
- [24] Vuorinen A H, Saharinen M H. Cattle and pig manure and peat cocomposting in a drum composting system: Microbiological and chemical parameters. *Compost Science & Utilization*, 2013, 7 (7): 54—65
- [25] Sanz M, López-Arias M, Rebollar E, et al. Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Chemosphere*, 2011, 83 (3): 318—326
- [26] Hanssan A, Ran B, Michael S. Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *Journal of Environmental Science & Health, Part A Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2008, 43 (8): 926—933
- [27] 胡宏韬, 程金平. 土壤铜镉污染的电动力学修复实验. *生态环境学报*, 2009, 18 (2): 511—514  
Hu H T, Chen J P. Experimental study on electrokinetic remediation of copper and cadmium contaminated soils (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18 (2): 511—514
- [28] Shahid M, Shukla A K, Bhattacharyya P, et al. Micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu) balance under long-term application of fertilizer and manure in a tropical rice-rice system. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16 (3): 737—747
- [29] Luo Q, Zhang X, Wang H, et al. The use of non-uniform electrokinetics to enhance in situ bioremediation of phenol-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 121 (1/3): 187—194
- [30] 徐海舟. 直流电场—东南景天联合修复Cd污染土壤效率的研究. 浙江临安: 浙江农林大学, 2015  
Xu H Z. Efficiency of direct current (DC) Field and *Sedum alfredii* Hance on remediation to cadmium contaminated soil (In Chinese). Lin'an, Zhejiang: Zhejiang A&F University, 2015
- [31] Chirakkara R A, Reddy K R, Ganeselle C. Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed

- contaminated soil. *Electrochimica Acta*, 2015, 181: 179—191
- [32] 邹晓霞, 陕红, 陈磊, 等. 秸秆和猪粪施用对樱桃萝卜的效果比较及对土壤性状的影响. *中国农学通报*, 2009, 25 (5): 165—172
- Zou X X, Shan H, Chen L, et al. Effects of pig manure and wheat straw application on plant growth and nutrient uptake of cherry radish (*Raphanus sativus*) and characteristics of soft fertility (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (5): 165—172
- [33] Tahmasbian I, Sinigani A A S. Monitoring the effects of chelating agents and electrical fields on active forms of Pb and Zn in contaminated soil. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185 (11): 8847—8860
- [34] Pardo T, Bernal M P, Clemente R. Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: I. Effects on trace elements and nutrients solubility and leaching risk. *Chemosphere*, 2014, 107: 121—128
- [35] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响. *水土保持学报*, 2014, 28 (3): 243—247
- Liu X Z, Ma Z H, Zhao X J. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (3): 243—247
- [36] Lim J M, Jin B, Butcher D J, et al. A comparison of electrical stimulation for electrodic and edta-enhanced phytoremediation of lead using indian mustard (*Brassica juncea*). *Bulletin- Korean Chemical Society*, 2012, 33 (8): 2737—2740
- [37] Sinigani A A S, Khalilikhah F. Effects of EDTA, sheep manure extract, and their application time on Cd uptake by *Helianthus annuus* from a calcareous mine soil. *Soil & Sediment Contamination*, 2010, 19 (3): 378—390
- [38] Sung K, Kim K S, Park S. Enhancing degradation of total petroleum hydrocarbons and uptake of heavy metals in a wetland microcosm planted with *Phragmites communis* by humic acids addition. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, 15 (6): 536—549
- [39] 李玉双, 胡晓钧, 侯永侠, 等. 利用白菜修复污灌区重金属污染土壤的螯合诱导植物修复技术. *沈阳大学学报 (自然科学版)*, 2014, 26 (1): 9—13
- Li Y S, Hu X J, Hou Y X, et al. Chelate-induced phytoextraction of heavy metal contaminated soil of irrigation area by cabbage (In Chinese). *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2014, 26 (1): 9—13
- [40] 刘晓娜. 螯合剂-AM菌根联合诱导植物提取修复重金属污染土壤的效应. 北京: 中国地质大学, 2012
- Liu X N. The effect of chelating agents and AM fungi for phytoremediation of heavy metals contaminated soils (In Chinese). Beijing: China University of Geosciences, 2012

## Intensification of Phytoremediation of Cd Contaminated Soil with Direct Current Field and Soil Amendments in Addition to Hyperaccumulator *Sedum Alfredii*

XIAO Wendan<sup>1</sup> YE Xuezh<sup>1†</sup> XU Haizhou<sup>2</sup> YAO Guihua<sup>2</sup> WANG Jingwen<sup>3</sup> LI Dan<sup>3</sup> ZHANG Qi<sup>1</sup>  
HU Jing<sup>1</sup> GAO Na<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory Breeding Base for Zhejiang Sustainable Pest and Disease Control, Institute of Quality and Standard for Agro-products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

(2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(3 Hangzhou Plant Protection and Soil Fertilizer Station, Hangzhou 310020, China)

**Abstract** 【Objective】 A pot experiment had been carried out to investigate effects of soil amendments (pig manure compost, humic acid, EDTA) and a switched polarity DC electrical field on phytoremediation of Cd contaminated soil with hyperaccumulator *Sedum alfredii*. 【Method】 In this experiment, plants of *Sedum alfredii*, a species of hyperaccumulator, were planted into pots containing loamy soil pretreated



with  $15 \text{ g kg}^{-1}$  of pig manure compost,  $10 \text{ g kg}^{-1}$  of humic acid, or  $5 \text{ mmol kg}^{-1}$  of EDTA, separately, as treatments and with nothing as control. In addition, the pots were subjected to another treatment: no-voltage (without electrical field) or direct current (DC) electrical field ( $1 \text{ V cm}^{-1}$  with switching polarity every day). At the end of the experiment, dry weights of shoots and roots of the plants, cadmium (Cd) concentration in the plants and soil available Cd (diethylene triamine pentaacetic acid (DTPA) extractable) were determined. **【Result】** Available (DTPA extracted) Cd in the soil increased significantly in the treatments subjected to DC electrical field and amended with pig manure compost, humic acid, or EDTA. The former increased DTPA-extractable Cd by 6.06% ~ 15.64%, while the latter did by 5.74% ~ 7.16%, 8.80% ~ 10.32% and 4.77% ~ 5.91%, respectively, with DC field on and by 2.84% ~ 3.32%, 7.70% ~ 9.47% and 7.10% ~ 7.75%, respectively, with DC field off. Cd concentration in the plant shoots significantly increased in the pots with DC field on, varying in the range of  $226.2 \sim 313.7 \text{ mg kg}^{-1}$ , and lingered in the range of  $178.7 \sim 212.6 \text{ mg kg}^{-1}$  with DC field off. Soil amendments (pig manure compost, humic acid, EDTA) also had significant effects on Cd concentration in the plant shoots ( $p < 0.05$ ). In addition, Cd concentration in the plant shoots was increased by 7.33% ~ 37.0%, 19.0% ~ 38.7% and 6.13% ~ 12.0% by the addition of pig manure compost, humic acid and EDTA, respectively. By switching the polarity of the DC electrical field, significant pH variation from anode to cathode can be avoided, and thus no significant impact was observed on shoot biomass of the plants. Soil amendments (pig manure compost, humic acid, EDTA) had significant effects on shoot biomass of the plants ( $p < 0.05$ ). The addition of  $15 \text{ g kg}^{-1}$  pig manure compost and  $10 \text{ g kg}^{-1}$  humic acid increased shoot biomass by 40.3% ~ 43.7% and 16.3% ~ 18.2%, respectively, while the addition of EDTA decreased shoot biomass by 7.3% ~ 7.5%. Cadmium concentration in shoot and plant shoot biomass are the most crucial factors for determining efficiency of the phytoextraction. The findings in this pot experiment demonstrate that DC field increases significantly ( $p < 0.01$ ) Cd accumulation in the plants in all the treatments, as compared with those with DC field off. Cd accumulation in shoots of the plants was in the range of  $2\ 088 \sim 4\ 014 \text{ } \mu\text{g pot}^{-1}$  with DC field on, and  $1\ 677 \sim 2\ 635 \text{ } \mu\text{g pot}^{-1}$  with DC field off. In addition, Cd accumulation in shoots of the plants was increased by 54.3% ~ 92.2% and 38.4% ~ 63.9% in the pots pretreated with pig manure compost and humic acid, respectively, because of their simultaneous effects of increasing Cd concentration in shoots and shoot biomass. However, no noticeable effect was observed in the EDTA treatment in comparison with the control, which can be ascribed to the inhibition of plant growth by EDTA. The combined use of pig manure compost-DC field and humic acid-DC field enhanced Cd accumulation in shoots by 134% and 100%, respectively. **【Conclusion】** Based on the findings, the amendment of pig manure compost or humic acid coupled with switched polarity DC electrical field could significantly enhance Cd phytoextraction by hyperaccumulator *Sedum alfredii*.

**Key words** Cadmium; Phytoremediation; Electrokinetic remediation; *Sedum alfredii*; Organic amendment

(责任编辑: 陈荣府)