



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201812060

中图分类号 X53

文献标识码 A

陈绩, 姚桂华, 倪幸, 等. 交流电场联合有机物料强化东南景天修复重金属镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2682-2690.

CHEN Ji, YAO Guihua, NI Xing, et al. AC electric field combined with organic materials enhancing *Sedum alfredii* Hance phytoremediation of cadmium-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2682-2690.

交流电场联合有机物料强化东南景天修复重金属镉污染土壤

陈绩, 姚桂华, 倪幸, 赵科理, 柳丹, 叶正钱*

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, 杭州 311300

第一作者: 陈绩(1989—), 男, 硕士研究生。研究方向: 污染场地修复等。E-mail: mush520@foxmail.com

*通信作者: 叶正钱(1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 植物营养与施肥等。E-mail: yezhiq@zafu.edu.cn

摘要 针对土壤重金属污染植物修复效率低的问题, 采用盆栽实验, 通过施加多种强度的交流电场(0、0.5、1.0 V·cm⁻¹)和不同种类的有机物料(黄腐酸钾、紫云英), 研究了交流电场及其与有机物料联合对重金属超积累植物东南景天修复重金属镉污染土壤效率的作用。结果表明, 交流电场促进了东南景天的生长和对重金属的吸收, 以 0.5 V·cm⁻¹ 作用最佳, 在电场处理组 20 d 后东南景天地上部 Cd 积累量比不施加电场的处理组提高了 48.1%。交流电场和有机物料联用可以进一步提升东南景天对土壤镉的累积, 施加黄腐酸钾处理组有利于土壤酸可提取态 Cd 的提高, 比对照组提高了 16.35%。在交流电场为 0.5 V·cm⁻¹ 条件下, 以 0.3% 施用效果最佳, 施加黄腐酸钾和紫云英分别是对照组(施加交流电场, 不施加有机物料)的 3.65 倍和 1.73 倍。有机物料和交流电场的共同作用极大地促进了东南景天镉的积累。

关键词 土壤重金属污染; 有机物料; 超积累植物; 植物修复; 交流电场

有机物料来源广泛、成本低, 能够补充土壤养分和改良土壤, 提高重金属生物可利用性, 促进植物积累^[1-3]。黄腐酸(fulvic acid)具有多种活性官能团, 施用后能够提高土壤镉的有效性^[4-5]。紫云英(*Astragalus sinicus* L.)作为一种我国南方常见的绿肥, 可以增加作物产量, 提高土壤重金属铜和锌的活性^[6]。

超积累植物修复土壤重金属具有成本低、不破坏土壤结构等优点。利用电场促进植物吸收是近年来土壤重金属修复新技术的研究之一。陈海峰等^[7]和仓龙等^[8]研究发现, 直流电场和螯合剂联用, 可促进黑麦草吸收重金属。而施加交流电场可避免电场两极偏酸或碱, 抑制植物生长的现象。LIM 等^[9]发现, 将超积累植物印度芥菜和交流电场联用, 可显著提高印度芥菜对 Pb 的积累。BI 等^[10]通过施加交流电场, 促进了植物生长和重金属富积。然而, 有机物料和交流电场联用对超积累植物修复土壤重金属的作用还鲜有报道。

本研究探讨了不同交流电场强度对超积累植物东南景天积累重金属的修复效果, 并在此基础上, 通过探索适宜的交流电场强度和有机物料的施加, 达到提高东南景天修复重金属污染土壤效

收稿日期: 2018-12-07; 录用日期: 2019-05-09

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2018C03028)

率的目的, 对缩短植物修复周期^[10-11]和促进研究成果转化具有现实意义。

1 材料与amp;方法

1.1 实验原料

本研究采用的东南景天 (*Sedum alfredii* Hance), 为多年生、可扦插的锌、镉超积累植物, 取自浙江省衢州市的一个古老铅锌矿, 后在浙江农林大学实验基地内栽培。供试重金属污染土壤 I 和土壤 II 先后采自温州市农科院实验基地, 均为 0~20 cm 的表层土壤, 阴凉处风干后, 过 5 mm 筛备用。2 种供试有机物料, 一种为黄腐酸钾, 为市售商品有机物料, 经研磨后备用; 另一种为绿肥紫云英, 采自未受重金属污染的农田, 晾干粉碎后备用。供试土壤和有机物料基本性质分别见表 1 和表 2。

表 1 供试土壤的基本性质
Table 1 Basic property of tested soils

供试土壤	pH	有机碳/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	全Cu/(mg·kg ⁻¹)	全Zn/(mg·kg ⁻¹)	全Pb/(mg·kg ⁻¹)	全Cd/(mg·kg ⁻¹)	有效Cu/(mg·kg ⁻¹)	有效Zn/(mg·kg ⁻¹)	有效Pb/(mg·kg ⁻¹)	有效Cd/(mg·kg ⁻¹)
I	4.69	3.98	270.48	60.5	354	670.3	1 293.69	444.57	7.61	389.24	600.47	207.96	1.23
II	6.23	34.04	246.96	74.86	365.5	84.64	428	109.1	2.65	8.14	54.2	16.8	0.6

表 2 供试有机物料的基本性质
Table 2 Basic properties of organic materials for test

供试物料	pH	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	全Cu/(mg·kg ⁻¹)	全Zn/(mg·kg ⁻¹)	全Pb/(mg·kg ⁻¹)	全Cd/(mg·kg ⁻¹)
紫云英	6.78	463.3	37.16	0.64	27.12	10.73	30.3	0.1	0.01
黄腐酸钾	7.46	234.61	99.86	0.16	4	2.95	8.13	4.79	0.15

1.2 实验方法

1) 不同交流电场强度对东南景天修复土壤重金属作用的影响。将土壤 I 装入塑料盆中, 装土 25 kg, 并移入生长一致的东南景天苗株, 每盆两侧插入石墨板, 与调压器相连, 交流电压强度梯度为 0、0.5、1.0 V·cm⁻¹。分别设置通电 20 d 和通电 40 d 2 个周期, 控制田间持水量 60%, 每个处理组做 3 次平行实验。2 个周期结束时, 采集植物和土壤样品。

2) 有机物料和交流电场联合对东南景天修复土壤重金属的影响。在上述实验基础上, 交流电场强度为 0 V·cm⁻¹ 和 0.5 V·cm⁻¹ 条件下, 黄腐酸钾 (HF) 以土重比 0%、0.3% 与供试土壤 II 混匀装盆, 每盆装土 4.5 kg, 移入东南景天苗株。设置 4 个处理组, 分别为不通电、不施黄腐酸钾 (0+0HF), 不通电、0.3% 黄腐酸钾 (0+0.3HF), 施加 0.5 V·cm⁻¹ 交流电场、不施黄腐酸钾 (0.5+0HF), 施加 0.5 V·cm⁻¹ 交流电场、0.3% 黄腐酸钾 (0.5+0.3HF); 每个处理组做 3 次平行实验。

3) 交流电场强化有机物料对东南景天修复土壤重金属的作用。基于上述实验, 交流电场强度为 0.5 V·cm⁻¹ 条件下, 选用黄腐酸钾 (HF) 和紫云英 (MV) 分别按土重比 0%、0.1%、0.3%、0.5% 与供试土壤 II 装盆, 设置 7 个处理组, 分别为 0.1HF、0.3HF、0.5HF、0.1MV、0.3MV、0.5MV、不施用有机物料 (CK); 每个处理组做 3 次平行实验。

4) 分析方法。土样经风干, 磨细, 分别过 10、100 目筛备用。新鲜植物样品洗净后测定鲜重; 70 °C 下烘干至恒重, 测定其干物质质量。磨碎后, 过 20 目筛供分析测定。

土壤 pH、有机质以及速效养分采用常规分析方法^[12]测定。土壤重金属有效态采用 HCl 浸提, 土壤重金属全量采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消煮, 植物样品采用 HNO₃-H₂O₂ 消煮。土壤重金属 Cd 形态分级采用 BCR 三步连续提取法^[13]。重金属元素含量均用电感耦合等离子发射光谱仪进行测定。

2 结果与讨论

2.1 不同交流电场强度对东南景天修复土壤重金属作用的影响

1) 交流电场对东南景天生长的影响。施加交流电场可促进东南景天生长^[14]。40 d 生长期, 0.5 V·cm⁻¹ 和 1.0 V·cm⁻¹ 处理组下的东南景天鲜重分别比对照组提高了 40.1% 和 24.5%(表 3), 0.5 V·cm⁻¹ 处理组中植株鲜重显著高于对照组 ($P<0.05$)。而东南景天的干重与对照组并无显著差异, 这说明交流电场通过促进水分的迁移和离子的运动可提高东南景天生物量。

2) 交流电场对东南景天地上部重金属含量的影响。由表 4 可知, 东南景天 20 d 生长期, 相比对照组, 电场处理组均可提高植物重金属元素含量。0.5 V·cm⁻¹ 处理组中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量提高达到显著 ($P<0.05$)。东南景天在 40 d 生长期下, 植株内重金属含量变化与 20 d 生长期一致, 但植物体内各重金属元素含量都比 20 d 生长期下有所下降。这表明在交流电场下, 东南景天在后 20 d 生长期中, 对重金属的吸收速率低于植株生长速率。

3) 交流电场对东南景天重金属积累量的影响。交流电场促进了东南景天重金属积累(表 5)。

20 d 生长期下, 0.5 V·cm⁻¹ 处理组东南景天 Cu、Zn、Pb、Cd 各重金属积累量均提高, 相比对照组分别提高了 89.9%、5.7%、46.9% 和 48.1%; 40 d 生长期下, 0.5 V·cm⁻¹ 处理组也显著增加了重金属

表 3 不同电压梯度对东南景天地上部生物量的影响
Table 3 Biomass of *Sedum alfredii* Hance shoots affected by different voltage gradients

通电时间/d	电压梯度/(V·cm ⁻¹)	单株鲜重/(g·株 ⁻¹)	单株干重/(g·株 ⁻¹)
20	0	2.82a	0.17a
20	0.5	3.33a	0.17a
20	1.0	3.20a	0.18a
40	0	4.49b	0.30a
40	0.5	6.29a	0.35a
40	1.0	5.59a	0.35a

注: 不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同电压梯度对东南景天地上部重金属含量的影响

Table 4 Heavy metal concentrations in *Sedum alfredii* shoots affected by different voltage gradients

通电时间/d	电压梯度/(V·cm ⁻¹)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
20	0	12.97b	10 537.27c	15.78b	208.55b
20	0.5	21.22a	12 032.64a	20.39a	297.94a
20	1.0	21.53a	11 365.41b	19.93a	207.51b
40	0	16.39b	9 837.44b	10.66b	163.61a
40	0.5	18.02ab	11 064.16a	13.99a	148.63a
40	1.0	18.42a	10 175.46b	13.68a	136.80a

注: 不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

表 5 不同电压梯度对东南景天重金属积累量的影响

Table 5 Effects of different voltage gradients on heavy metal accumulation in *Sedum alfredii* shoots

通电时间/d	电压梯度/(V·cm ⁻¹)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
20	0	2.18b	1 988.39a	2.43b	33.91b
20	0.5	4.14a	2 101.06a	3.57a	50.22a
20	1.0	4.15a	2 061.23a	3.32ab	40.22b
40	0	5.22b	3 276.41b	3.58b	47.55b
40	0.5	6.57a	4 152.46a	4.90a	58.91a
40	1.0	6.73a	3 826.83ab	4.76a	46.37b

注: 不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

的积累, 但增幅不及 20 d 生长期。对于 Cd, $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 处理组东南景天重金属累积量显著高于 $1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的处理组, 40 d 生长期相比 20 d 生长期, 东南景天重金属累积量显著提升。

2.2 有机物料和交流电场联合对东南景天修复土壤重金属的影响

1) 交流电场下不同处理组对东南景天生长和重金属含量的影响。由表 6 可知, 交流电场和黄腐酸钾联用对东南景天生长促进效果最显著。单一交流电场或单施黄腐酸钾均促进了东南景天地上部的生长, 但施加黄腐酸钾的作用更明显; 与对照组相比, 交流电场、黄腐酸钾或二者联用都显著提高了东南景天地上部 Zn 含量; 当施用黄腐酸钾时, 无论是否施加电场, 均提高了 Pb 含量; 对于 Cd, 单一交流电场或单施黄腐酸钾处理组相较对照组均没有显著差异, 只有当交流电场联用黄腐酸钾时, 植株 Cd 含量才显著高于对照组。

表 6 有机物料和交流电场对东南景天地上部生长和重金属含量的影响

Table 6 Effect of organic material and AC electric field on plant growth and heavy metal concentrations in shoots of *sedum alfredii*

处理组	鲜重/(g·株 ⁻¹)	干重/(g·株 ⁻¹)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
0+0HF	3.57c	0.23c	8.35a	5 503.05c	3.28c	110.35b
0+0.3HF	7.75a	0.47ab	8.78a	7 319.47a	5.45ab	123.38ab
0.5+0HF	5.81b	0.32abc	7.35a	6 010.12b	4.21bc	99.86b
0.5+0.3HF	8.56a	0.51a	7.84a	7 068.31a	6.44a	135.80a

注: 不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

2) 交流电场下施加有机物料对东南景天重金属积累的影响。由表 7 可知, 单一施加交流电场或黄腐酸钾均能促进东南景天地上部重金属积累, 二者联用效果更显著。0.5+0HF 处理组中重金属累积量明显高于对照组, 这与对其他植物的研究结果^[10, 14]一致。0.5+0.3HF 处理组极大地提高了东南景天地上部重金属积累, Zn 和 Cd 累积量显著高于其他处理组 ($P<0.05$), 分别是对照组 (0+0HF) 的 2.95 倍和 2.73 倍。这与肖文丹等^[15]的研究结果相似。

表 7 有机物料和交流电场对东南景天地上部单株重金属积累量的影响

Table 7 Effect of organic material and AC electric field on the heavy metal accumulation in *Sedum alfredii* shoots

处理组	重金属累积量/($\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)			
	Cu	Zn	Pb	Cd
0+0HF	1.92b	1 225.72d	0.75b	25.31d
0+0.3HF	4.13a	3 441.26b	2.42ab	58.00b
0.5+0HF	2.31b	1 925.28c	1.33b	35.75c
0.5+0.3HF	4.07a	3 617.45a	3.29a	69.17a

2.3 交流电场强化有机物料对东南景天修复土壤重金属的作用

1) $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下不同有机物料对东南景天生长的影响。在 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下, 施加有机物料可促进植物生长^[16]。由图 1 可知, 与对照组相比, 各处理组东南景天植株的生物量均有显著提高。在施加 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下, 在 0.3% 施用量下 2 种有机物料对东南景天生长促进的作用最大, 施加黄腐酸钾效果更为突出; 而在 0.5% 有机物料的施用量下, 添加 2 种有机物料, 东南景天的生物量有所下降, 表明有机物料施用量过高, 抑制了东南景天生长。

2) $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下不同有机物料对土壤 pH 的影响。由图 2 可知, 在 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的条件下, 与对照组相比, 2 种有机物料均降低了土壤 pH, 施加黄腐酸钾的土壤 pH 下降了近 0.3 个单位, 显著低于对照组 ($P<0.05$), 这可能与黄腐酸钾分解产生的有机酸有关。

3) $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下不同有机物料对土壤有机质含量的影响。有机物料可通过调控土壤的理化性质从而进一步影响 Cd 的有效性^[17]。生长在高浓度有机质环境下的植物更易积累重金属^[18]。秸秆还田提高了土壤有机质和养分含量, 提高了伴矿景天 Cd 的积累量^[19]。在施加电场为 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$

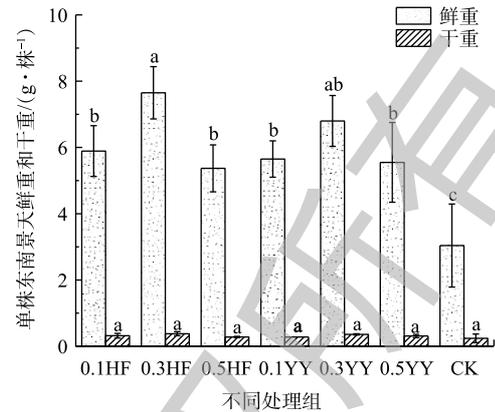
的条件下, 2种有机物料的添加均显著提高了土壤有机质含量, 添加紫云英对土壤有机质的提高效果略优于添加黄腐酸钾, 这可能和紫云英本身有机碳水平较高有关(图3)。

4) $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下不同有机物料对土壤重金属有效态的影响。由表8可知, 在施加 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下, 与对照组相比, 在0.5%用量下, 2种有机物料均显著提高了土壤重金属有效态含量。这可能与有机物料分解产生的有机酸比例有关, 有机物在土壤中分解成小分子酸和大分子酸, 小分子酸活化土壤中重金属, 而大分子酸则相反, 降低土壤重金属的活性, 0.5%用量紫云英处理组小分子酸比例较高, 提高了重金属的活性。

5) 电场强度为 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下不同有机物料对东南景天地上部重金属含量的影响。在电场强度为 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下, 与对照组相比, 添加2种有机物料的处理组均表现为: 在较低用量水平(0%~0.3%)下, 随着有机物料用量的增加, 东南景天地上部重金属元素含量均得到提高(0.1%紫云英处理组中Zn含量最高), 且黄腐酸钾的作用显著强于紫云英(表9); 而在0.5%用量下, 添加2种有机物料的处理组均抑制了东南景天地上部重金属含量。

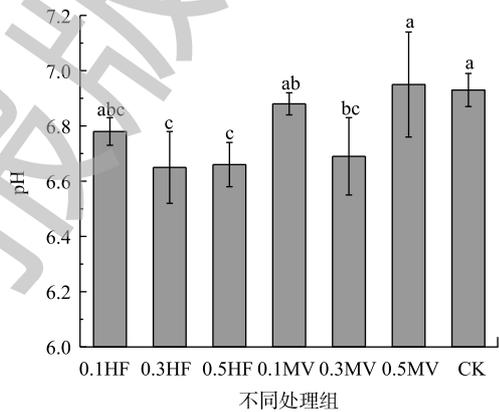
6) $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 条件下施加不同有机物料对东南景天地上部重金属积累的影响。如表10所示, 在 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电场条件下, 与对照组相比, 2种有机物料施加均促进了东南景天重金属积累, 施加黄腐酸钾整体表现更优。东南景天重金属积累与有机物料用量相关, 在0.3%用量下, 2种有机物料均显著提高了东南景天地上部重金属累积量, 而在0.5%用量下, 东南景天地上部重金属累积量与对照组相比, 提升不大, 部分重金属元素积累量还出现下降。这可能与有机物料矿化分解产生的大分子酸和小分子酸有关^[20]。

施加2种有机物料, 均促进了东南景天Cd的累积。施加黄腐酸钾降低了土壤pH, 调控重金属络合物的形成, 提高其生物可利用性^[21], 此外, 黄腐酸钾与交流电场联用, 促进了植物生长和新陈代谢, 提高东南景天根系对重金属的吸收。根据陈建斌^[22]的研究, 紫云英在作物生长



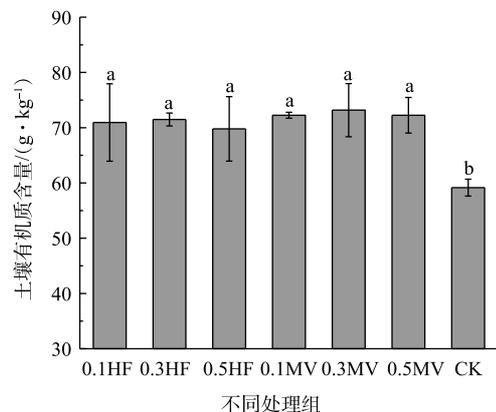
注:不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图1 不同处理组对东南景天地上部生物量的影响
Fig. 1 Biomass of *Sedum alfredii* Hance shoots affected by different treatments



注:不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图2 不同处理组对土壤pH的影响
Fig. 2 Effect of different treatments on soil pH



注:不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图3 不同处理组对土壤有机质含量的影响
Fig. 3 Effect of different treatments on soil organic matter content

表 8 不同处理组对土壤重金属有效性的影响

Table 8 Soil available heavy metal concentrations affected by different treatments

有机物料	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
0.1%黄腐酸钾	14.63ab	55.86a	17.43ab	0.64b
0.3%黄腐酸钾	11.55d	49.02ab	15.03b	0.72ab
0.5%黄腐酸钾	15.08ab	56.27a	17.19ab	0.68ab
0.1%紫云英	13.80ab	52.28ab	16.98ab	0.67ab
0.3%紫云英	11.48d	45.93b	15.52b	0.68ab
0.5%紫云英	15.82a	55.68a	18.84a	0.75a
CK	13.49cd	49.95ab	17.12ab	0.65b

注：不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

表 9 不同处理组对东南景天地上部重金属含量的影响

Table 9 Effect of different treatments on heavy metal concentrations in *Sedum alfredii* Hance shoots

有机物料	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)
0.1%黄腐酸钾	8.98a	5 106.16cd	4.73ab	77.87b
0.3%黄腐酸钾	10.27a	7 511.02a	7.68a	129.32a
0.5%黄腐酸钾	5.66ab	4 072.55d	5.29ab	70.46bc
0.1%紫云英	6.61ab	6 195.01b	5.31ab	84.92b
0.3%紫云英	6.93ab	5 449.83cd	5.48ab	72.00bc
0.5%紫云英	4.25b	3 479.19d	1.32c	40.32c
CK	6.11ab	4 937.66cd	3.63bc	71.07bc

注：不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

表 10 不同处理组对东南景天地上部植物重金属积累的影响

Table 10 Effect of different treatments on heavy metal accumulation in *Sedum alfredii* Hance shoots

有机物料	Cu/(μg·株 ⁻¹)	Zn/(μg·株 ⁻¹)	Pb/(μg·株 ⁻¹)	Cd/(μg·株 ⁻¹)
0.1%黄腐酸钾	3.20ab	1 658.65b	1.94ab	23.65b
0.3%黄腐酸钾	3.83a	3 722.15a	2.56a	53.50a
0.5%黄腐酸钾	1.55c	1 315.97b	1.10bc	21.32bc
0.1%紫云英	1.82bc	1 922.73b	1.18bc	25.33b
0.3%紫云英	1.63c	1 538.79b	1.69b	25.40b
0.5%紫云英	1.12c	1 093.23b	0.57c	15.07c
CK	2.45abc	978.55b	0.55c	14.64c

注：不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

初期抑制了 Cd 有效态水平，至作物的成熟期，吸附的 Cd 逐渐释放，促使 Cd 有效态水平提高，这在东南景天地上部累积量上也有所体现，0.5% 用量下虽然显著提高土壤 Cd 有效态含量，然而东南景天地上部 Cd 累积量和对照组没有差异。

7) 电场 $0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下施加有机物料对土壤 Cd 形态转化的影响。土壤 Cd 的形态可分为酸可提取态、还原态、氧化态和残渣态^[23]。有研究^[24-25]表明，黑麦草和芥菜吸收的主要是酸可提取态 Cd，

此外,可还原态 Cd 可能逐步转化为植物可利用性。土壤中 Cd 形态转化与土壤 pH、有机质关系密切^[26]。但本研究中土壤酸可提取态 Cd 含量虽与 pH 呈负相关趋势(表 11),随土壤 pH 的降低而有所增加,但未达到显著相关($r=-0.37$),这可能与土壤中的酸可提取态 Cd 比例较高(表 12),以及不同处理组间土壤 pH 变化幅度较小有关(图 2)。

表 11 土壤重金属 Cd 不同形态与理化性质的相关关系
Table 11 Correlations between different soil heavy metal Cd forms and physicochemical properties

	有机质	pH	酸可提取态Cd	可还原态Cd	可氧化态Cd	残渣态Cd
有机质	1	—	—	—	—	—
pH	-0.697**	1	—	—	—	—
酸可提取态Cd	0.093	-0.37	1	—	—	—
可还原态Cd	-0.177	0.135	-0.496*	1	—	—
可氧化态Cd	0.203	-0.466	0.249	-0.095	1	—
残渣态Cd	-0.383	0.666**	-0.33	0.199	-0.855**	1

注: *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。

施加有机物料显著提高土壤有机质含量(图 3),但由于矿化和腐殖化作用,产生的小分子有机物活化土壤重金属,形成复杂的腐殖物质降低重金属有效性,这表明土壤有机质含量变化对不同形态 Cd 之间转化影响不明显,这与已有研究结果^[13]一致。

随着有机物料在土壤中的转化,土壤重金属形态因受其影响也发生相应的形态转化(表 12)。在交流电场作用下,施加黄腐酸钾的处理组相对对照组,酸可提取态 Cd 整体上升,增幅为 11.66%~16.35%,而施用黄腐酸钾的各处理组可还原态相较对照组均有所降低,可氧化态和残渣态的变化微小或略有所下降,这表明在交流电场和黄腐酸钾共同作用下促进了还原态 Cd 向酸可提取态的转化。

3 结论

1) 交流电场可促进东南景天生长和重金属的积累。在交流电场强度分别为 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下,通电 40 d 后,植物生物量分别是对照组的 1.4 倍和 1.2 倍;交流电场强度为 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$,通电 20 d 和 40 d 后,东南景天地上部 Cd 积累量分别是对照组的 1.5 倍和 1.2 倍。

2) 交流电场可强化有机物料对东南景天地上部吸收积累重金属。在 $0.5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的电场强度和 0.3% 黄腐酸钾的联合作用下,东南景天地上部 Cd 积累量是对照组(不施加交流电场和黄腐酸钾)的 2.7 倍。

3) 交流电场联合有机物料可促进东南景天生长和重金属累积。在交流电场作用下,2 种有机物料的添加均促进了东南景天对 Cd 的吸收积累,0.3% 用量最佳,施加黄腐酸钾和紫云英 Cd 积累量分别是对照组(不施加有机物料)的 3.6 倍和 1.7 倍。

表 12 不同处理组对土壤 Cd 形态的影响

Table 12 Effect of different treatments on soil cadmium forms

有机物料	可交换态/%	还原态/%	氧化态/%	残渣态/%
0.1%黄腐酸钾	32.96	39.49	5.19	22.36
0.3%黄腐酸钾	32.89	38.81	4.59	23.71
0.5%黄腐酸钾	32.25	40.67	6.43	20.65
0.1%紫云英	30.63	43.41	6.44	19.52
0.3%紫云英	32.52	44.94	5.06	17.48
0.5%紫云英	30.76	41.28	3.99	23.97
CK	29.71	42.42	5.56	22.31

参 考 文 献

- [1] 姚桂华. 交流电场-有机物料提高东南景天修复重金属污染土壤效率的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [2] 姚桂华, 吴东涛, 胡杨勇, 等. 淹水条件下有机肥对土壤重金属形态转化及迁移的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(1): 127-133.
- [3] 王阳, 刘恩玲, 王奇赞, 等. 紫云英还田对水稻镉和铅吸收积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 189-193.
- [4] 李仲谨, 李铭杰, 王海峰, 等. 腐植酸类物质应用研究进展[J]. *化学研究*, 2009, 20(4): 103-107.
- [5] 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[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, 15(6): 536-549.
- [6] 丁炳红. 紫云英等有机物料还田对稻田氮磷损失及重金属活性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [7] 陈海峰, 周东美, 仓龙, 等. 垂直电场对EDTA络合诱导铜锌植物吸收及其迁移风险的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 174-178.
- [8] 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[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 729-735.
- [9] LIM J M, JIN B, BUTHER D J. A comparison of electrical stimulation for electronic and EDTA-enhanced phytoremediation of lead using Indian mustard (*Brassica juncea*)[J]. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2012, 33(8): 2737-2740.
- [10] BI R, SCHLAAK M, SIEFERT E, et al. Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and tobacco (*Nicotiana tabacum*)[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(3): 318-326.
- [11] BAKER A J M, BROOKS R R, BAKER A J M, et al. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989, 1(2): 81-126.
- [12] 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.
- [13] 曹会聪, 王金达, 张学林. BCR法在污染农田黑土重金属形态分布研究中的应用[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 163-166.
- [14] CHIRAKKARA R A, REDDY K R, CAMESELLE C. Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed contaminated soil[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 181: 179-191.
- [15] 肖文丹, 叶雪珠, 徐海舟, 等. 直流电场与添加剂强化东南景天修复镉污染土壤[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 927-937.
- [16] 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 等. 几种有机物料对设施菜田土壤Cd、Pb生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 4011-4019.
- [17] KHAN M A, KHAN S, KHAN A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 1591-1605.
- [18] OUDEH M, KHAN M, SCULLION J. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 116(2): 293-300.
- [19] ZHOU T, WU L, CHRISTIE P, et al. The efficiency of Cd phytoextraction by *S. plumbizincicola* increased with the addition of rice straw to polluted soils: The role of particulate organic matter[J]. *Plant & Soil*, 2018, 429(1/2): 321-333.
- [20] LI J, LU Y, SHIM H, et al. Use of the BCR sequential extraction procedure for the study of metal availability to plants[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(2): 466-471.

- [21] 曾炜铨, 宋波, 袁立竹, 等. 改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2306-2313.
- [22] 陈建斌. 有机物料对土壤的外源铜和镉形态变化的不同影响[J]. 农业环境科学学报, 2002, 21(5): 450-452.
- [23] QUEVAUVILLER P, RAURET G, GRIEPINK B. Single and sequential extraction in sediments and soils[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993, 51(1/2/3/4): 231-235.
- [24] 李勇, 朱亮, 王超. 黑麦草对土壤中Cd不同赋存形态的吸收规律[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 353-356.
- [25] 林汲, 程琛, 韩明强, 等. 硅藻土有机肥有机物料对Cd-Zn复合污染土壤重金属形态和有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 366-371.
- [26] 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*[J]. Plant and soil, 2010, 326(1/2): 453-467.

(本文编辑: 金曙光, 曲娜, 郑晓梅)

AC electric field combined with organic materials enhancing *Sedum alfredii* Hance phytoremediation of cadmium-contaminated soil

CHEN Ji, YAO Guihua, NI Xing, ZHAO Keli, LIU Dan, YE Zhengqian*

Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

*Corresponding author, E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

Abstract To improve the phytoremediation efficiency of heavy metals contaminated soils, soil pot experiments were carried out to study the effect of alternating current (AC) electric field combining with organic materials on *Sedum alfredii* (hyper-accumulator) remediation efficiency of cadmium (Cd) -contaminated soil. Different AC electric field gradients (0, 0.5 and 1.0 V·cm⁻¹) and different organic materials (potassium fulvate and milk vetch) (with application rates of 0.1%, 0.3%, 0.5%) treatments were tested. The results showed that the AC electric field could promote the growth of *Sedum alfredii* and its uptake of heavy metals, and 0.5 V·cm⁻¹ AC electric field presented the best effect. After 20 d AC electric field treatment, the Cd accumulation in the aboveground part of *Sedum alfredii* was 48.1% higher than that without AC electric field enhancement. The combination of AC electric field and organic materials further enhanced the absorption of soil heavy metals by *Sedum alfredii*. The application of two organic materials (potassium fulvate and milk vetch) had positive effects on the soil heavy metal availabilities. Potassium fulvate application elevated the soil acid-extractable Cd concentration, which was 16.35% higher than that of the control. At AC electric field of 0.5 V·cm⁻¹ and 0.3% organic material of potassium fulvate or milk vetch, the greatest enhancement on Cd accumulation in plant shoots of *Sedum alfredii* Hance occurred, which was 3.65 and 1.73 times higher than that of control(only with AC electric field enhancement), respectively. Consequently, heavy metal accumulation in plant shoots of *Sedum alfredii* was greatly promoted by the combined application of organic materials and AC electric field.

Keywords soil heavy metal pollution; organic materials; hyper-accumulator; phytoremediation; AC electric field