



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202304060

中图分类号 X53

文献标识码 A

周垂康, 毛詹晟, 方先芝, 等. 交流电场频率对柳树-东南景天混栽修复镉污染土壤的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3046-3053. [ZHOU Chuikang, MAO Zhansheng, FANG Xianzhi, et al. Effect of AC electric field frequency on remediation of cadmium contaminated soil by willow- *Sedum alfredii* Hance mixed planting[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3046-3053.]

交流电场频率对柳树-东南景天混栽修复镉污染土壤的影响

周垂康^{1,2}, 毛詹晟^{1,2}, 方先芝^{1,2}, 赵科理^{1,2}, 马嘉伟^{1,2}, 柳丹^{1,2}, 叶正钱^{1,2,✉}

1. 浙江农林大学, 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300; 2. 浙江农林大学, 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 杭州 311300

摘要 单一植物吸收的方法修复镉(Cd)污染土壤效果欠佳, 交流电场联合植物可以更好地提高土壤Cd污染的治理效率。通过优化电场频率等参数可以提高土壤Cd的移动性, 促进植物吸收土壤Cd。采用土壤盆栽试验的方法, 研究交流电场频率(50、300 Hz)对竹柳3号和东南景天混种条件下土壤理化性质、Cd有效性、植物生长和Cd吸收积累能力的影响。与对照(没有施加电场)相比, 300 Hz电场处理的土壤pH值显著降低了0.13。电场频率的提高显著提升了土壤Cd的有效性, 300 Hz频率电场处理的土壤有效态Cd质量分数显著高于对照35.00%。交流电场促进了植物生长, 柳树和东南景天的株高、生物量、叶片SPAD值及根系形态指标在外加50、300 Hz交流电场时均得到提高。交流电场降低了柳树各部分和东南景天地下部Cd质量分数, 其中50 Hz处理柳树叶片、枝条、树干、根系和东南景天地下部Cd质量分数较对照分别降低22.16%、29.82% ($P<0.05$)、1.49%、15.91% ($P<0.05$)、31.81% ($P<0.05$)。相反, 电场频率的提高有利于东南景天地上部Cd质量分数增加, 50、300 Hz处理东南景天地上部Cd质量分数较对照分别增加43.37%、55.18% ($P<0.05$)。交流电场提高了植物对土壤Cd吸收积累, 但不同的电场频率对植物Cd修复效率影响不同, 50、300 Hz交流电场下植物地上部分总Cd积累量较对照分别显著增加24.04%、21.24%。从这2种植物上看, 50 Hz交流电场更能提高柳树Cd修复效率, 300 Hz交流电场更提高东南景天Cd修复效率。本试验装置成本较低, 修复效果较好, 对于电场频率增强植物修复Cd效率具有很大参考价值, 有较好的应用前景。

关键词 交流电场; 电场频率; 植物修复; 镉; 土壤

土壤重金属污染是指人类在生产活动中将大量重金属带入土壤, 严重破坏土壤生态系统的现象^[1]。土壤重金属易在食用作物中富集, 通过食物链在人体蓄积, 严重危害人体健康^[2]。在农田土壤重金属污染中, 镉(Cd)污染是危害最严重的一种^[3]。目前, 土壤Cd污染修复技术主要分为物理、化学和生物修复技术。植物修复技术成本低、生态友好、易被大众接受, 但其修复周期长, 修复效果受植物特性如根系分布深度等的限制而存在一定局限性^[4]。电动修复因其修复周期短、去除率高、能同时去除多种污染物等优点而成为一种具有较好应用前景的重金属污染土壤修复技术^[5]。施加直流电场时, 土壤中OH⁻和H⁺分别向阴极、阳极迁移积累, 造成电极处附近极化现象^[6]。而交流电场不会发生土壤pH的剧烈变化, 并能改善土壤均匀性^[7]。将交流电场和植物修复相结合, 可以通过强化植物生长、提高植物吸收重金属能力或是提高土壤中重金属的有效性来提高修复效率^[8]。

已有研究表明, 施加交流电场可以促进龙葵(*Solanum nigrum* L)^[9]、褪色柳(*Salix discolor*)^[10]、东南景天(*Sedum alfredii* Hance)^[11]、莴苣(*Lactuca sativa*)^[12]等植物的生长, 加强Cd在植物体内的积累。除了电场类型外, 电场频率也是重要的影响参数。在较短时间内, 交流电场频率由50 Hz提升到400 Hz过程中,

收稿日期: 2023-04-14; 录用日期: 2023-08-31

基金项目: “尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C02022)

第一作者: 周垂康(1998—), 男, 硕士研究生, zhouch@stu.zafu.edu.cn; ✉通信作者: 叶正钱(1965—), 男, 博士, 教授, yezhq@zafu.edu.cn

土壤重金属的浸出质量浓度有增加的趋势^[13]。预试验也显示相似结果，通过土壤培养的试验方法，设置电场频率为 0~400 Hz，研究电场频率对土壤 Cd 活性的影响，结果显示电场频率为 300 Hz 时，土壤有效态 Cd 质量分数提高最明显，为电动修复技术的优化提供了参考。HE 等^[14]研究发现 1 Hz 脉冲电场作用可以提高玉米根系生物量。此外，低频 (60 Hz) 交流电场也能促进拟南芥地上部的增长^[15]。然而较高电场频率对植物生长及土壤重金属的修复作用还有待研究。

柳树以其快速生成深根系统、高生物量、高蒸腾速率和能富集重金属等优点，在重金属污染修复实践中越来越受到重视^[16]。重金属 Cd 超积累植物东南景天生长速率较快、富集 Cd 能力强，是理想的植物修复材料^[17]，但其为浅根系植物。植物混种系统可以丰富土壤生物群落，有利于互补作物生长和改善土壤健康^[18]，柳树和东南景天混种能够增加植物对地面空间的利用，从而可能促进土壤修复效率的提高。先前的研究表明，交流电场促进了柳树、东南景天对土壤 Cd 的吸收积累^[11, 19-20]。因此，本研究通过盆栽试验的方法，探讨不同的交流电场频率 (低频 50 Hz，高频 300 Hz) 对竹柳 3 号 (*Salix sp.*) 和东南景天混种条件的土壤理化性质、Cd 有效性、植物生长和 Cd 吸收积累能力的影响，为土壤重金属污染治理提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验原料

试验土壤：土壤采自浙江富阳某地重金属 Cd 污染表层 0-20 cm 的农田土壤，阴凉风干后过 5 目筛备用，试验土壤的基本理化性质见如下：pH, 7.27；有机质, 40.12 g·kg⁻¹；速效钾, 176.00 mg·kg⁻¹；碱解氮, 202.39 mg·kg⁻¹；有效磷, 15.25 mg·kg⁻¹；有效态 Cd, 0.31 mg·kg⁻¹；全 Cd, 1.68 mg·kg⁻¹。

试验植物：将长势一致且良好的竹柳 3 号 (浙江绿鑫晨农开发有限公司) 剪成 15 cm 插条，用去离子水洗净并培育 1 周长根发芽以备试验；将长势一致、去顶芽、带叶片的东南景天 (浙江农林大学平山实践基地) 剪成 5 cm 插穗，在去离子水中洗净备用。

1.2 试验方法

土壤盆栽试验于 2022 年 4 月进行，试验分为 3 个处理：对照 (CK)，不通电；通电 0.5 V·cm⁻¹，电场频率为 50 Hz (低频)；通电 0.5 V·cm⁻¹，电场频率为 300 Hz (高频)。交流电场 24 h 持续开启 60 d，每个处理设置 3 个重复，随机区组设计。每个盆栽 (直径为 20 cm，高为 15 cm) 装入 4 kg 充分混匀的试验土壤，在盆栽的直径两端放入石墨棒 (直径为 1 cm，高为 10 cm)，用去离子水调节土壤含水量至土壤田间持水量的 70%，每盆扦插 2 株竹柳，间距约为 5 cm，扦插 5 株东南景天于周围，间距约为 3 cm。扦插 1 周后利用变频电压器 (PA9505，东莞纳普电子科技有限公司，中国) 调节电压和频率。每天称量盆栽保持土壤水分，生长 60 d 后采集植物和土壤样品。图 1 为试验示意图。

1.3 分析方法

土壤样品收集后在阴凉处风干，过 10 目和 100 目筛。土壤基本理化性质测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[21]。土壤 pH 值采用 pH 计 (PB-10，赛多利斯，德国) 电位法测定 (水土比 2.5:1)；土壤速效钾 (AK)、碱解氮 (AN)、有效磷 (AP) 分别采用醋酸铵浸提-火焰光度法、碱解扩散法和碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定，土壤有机质质量分数 (SOM) 采用重铬酸钾外加热法。土壤有效态 Cd 质量分数 (ACd) 采用二乙胺三胺五乙酸-氯化钙-三乙醇胺 (DTPA-CaCl₂-TEA) 浸提 (水土比 2:1)，石墨炉原子吸收光谱仪 (AA-7000，岛津，日本) 测定。

在植物收获前 (生长 60 d) 测量植物株高，并使用叶绿素仪 (SPAD-502 Plus，柯尼卡美能达，日本) 对

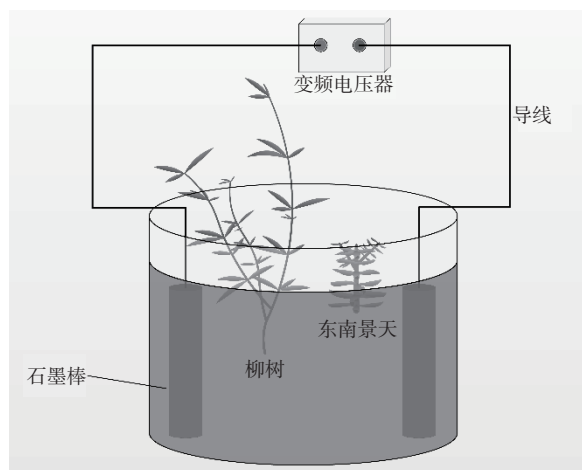


图 1 交流电场频率联合植物修复污染土壤装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC electric field frequency combined with phytoremediation remediation contaminated soil

植物成熟功能叶片(植株从上往下数的第 5 片叶)测定 SPAD 值。植物样品收集后用自来水、去离子水先后清洗干净,吸水纸吸收多余水分,将竹柳分为叶片、枝条、树干、根系,东南景天分为地上部和地下部,植物根系采用根扫描仪(EPSON V700, 爱普生, 中国)与 Win RHIZO 分析软件测定根系形态参数^[22]。继续将植物各部分在烘箱中 105 °C 杀青 15 min 后再调至 70 °C 烘至恒重,测定植物干重,研磨过 20 目筛。硫酸双氧水消煮植物样品,待样品消解至澄清或灰白色,定容至 50 mL,石墨炉原子吸收光谱仪测定消煮液中 Cd 元素质量浓度^[21],植物的质控样品为 GBW07603 (GSV-2) 灌木树枝,回收率为 93.78%。

2 结果与讨论

2.1 电场对土壤基本理化性质和有效态 Cd 的影响

不同处理的土壤基本理化性质和有效态 Cd 质量分数见表 1。经过电场处理后,50 Hz 处理的土壤 pH 值不变,而施加电场频率为 300 Hz 的处理改变了土壤 pH 值,与对照相比显著降低了 0.13 个单位。在 300 Hz 频率电场下土壤 pH 值略有降低,可能是较高的电场频率刺激了柳树根系分泌物的分泌,分泌出的 H⁺和有机酸降低了土壤 pH 值^[23]。土壤中 AN、AP、SOM 在不同处理下均无显著性差异,但 300 Hz 处理提高了 AK。这可能是因为较高频率的电场作用调控植物和土壤微生物的代谢作用,将钾元素转化成速效钾。电动力学修复可以提高土壤有效态 Cd 质量分数。50 Hz 处理的土壤有效态 Cd 质量分数高于对照 10.00%,随着电场频率的提高,300 Hz 处理的土壤有效态 Cd 质量分数显著高于对照 35.00%。电场作用可以促进 Cd 离子从土壤颗粒中解吸出来^[24],残渣态向交换态转化^[10],从而提高土壤有效态 Cd 质量分数。电场频率的提高增加了金属离子的活性,这可能是由于 300 Hz 频率的交流电场电极交换频率比 50 Hz 频率更快,电流的快速变化可能使离子在土壤中振动频率加快并产生热量,在一定程度上可以促使金属离子的活化。

表 1 不同处理对土壤基本理化性质和有效态 Cd 的影响

Table 1 Effects of different treatments on basic physical and chemical properties and available Cd of soil

处理组	pH	AK/(mg·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	SOM/(g·kg ⁻¹)	ACd/(mg·kg ⁻¹)
CK	7.40±0.01a	48.00±3.61b	170.98±4.36a	20.80±6.41a	48.20±2.48a	0.20±0.01b
50Hz	7.40±0.03a	47.00±5.00b	167.03±4.40a	25.92±5.55a	45.31±2.31a	0.22±0.01b
300Hz	7.27±0.04b	59.00±1.00a	166.24±5.48a	17.38±1.28a	44.85±1.34a	0.27±0.03a

注: 同列数据后不同小写字母代表不同处理间达到显著水平 ($P<0.05$)。

2.2 电场对植物生长的影响

1) 株高和叶片 SPAD 值。由图 2 可知,不同处理下植物株高和叶片 SPAD 值的表现趋势一致,施加电场处理的植物株高和叶片 SPAD 值均增加,并且 2 种植物都在 50 Hz 电场条件下达到最大值。ELISHA 等^[25]研究发现,外加电场可以提高非洲龙葵 (*Solanum scabrum* Mill.) 叶绿素的生物合成,因为电场作用会诱导应力介质电化学质子梯度或细胞质和液泡 pH 等的变化,植物通过增加初级和次级代谢物生物合成(叶绿素、类胡萝卜素)以稳定环境的变化。叶片 SPAD 值表明植物叶片叶绿素的相对值,叶绿素具有捕获太阳能进行光合作用的重要作用,叶绿素值的增加可以促进树木的生长^[26]。50 Hz 处理相较于 300 Hz 处理有更好的表现,这可能是由于较高(300 Hz)的电场频率对植物细胞的刺激效果不及 50 Hz,对植物生长的促进作用有所降低。

2) 生物量。由表 2 可知,施加电场可以促进植物生长,柳树生物量在 50 Hz 电场频率处理下效果最明显,东南景天在 300 Hz 电场频率处理下效果最好。中低电压电场能提高抗氧化酶活性,降低丙二醛水平,从而提高植物生物量^[27]。外加电场可以刺激活细胞的电生理机能促进植物生长,提高植物生物量^[28]。电场会影响植物根细胞质膜的膜电位和酶活性,增加带电离子对膜的亲和力,促进植物根系对矿物质营养吸收,从而促进植物的新陈代谢,有利于植物生长发育^[29]。此外,适宜强度的电场也能调节微生物代谢和生长^[30]。然而柳树生长在 300 Hz 交流电场时促进效果有所减弱,这可能是由于较高频率电场电解出更多的 OH⁻,与水里氧分子催化生成超氧阴离子自由基,过量的超氧阴自由基损害脂质、核酸、蛋白质^[31]。

3) 根系形态指标。表 3 显示,施加电场处理的柳树根系长度、根系表面积、根尖数随着电场频率的增

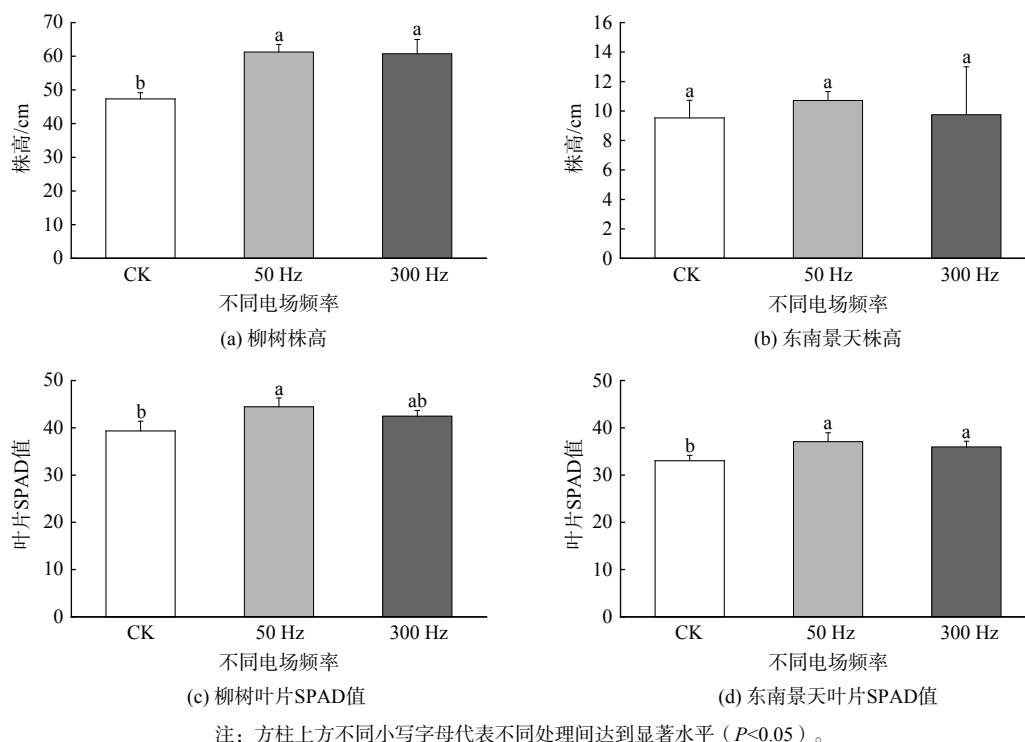


图 2 不同处理对植物株高和叶片 SPAD 值的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on plant height and leaf SPAD value

表 2 不同处理对植物生物量的影响

Table 2 Effects of different treatments on plant biomass

$g \cdot 株^{-1}$

处理组	柳树干重					东南景天干重		
	叶片	枝条	树干	根系	整株	地上部	地下部	整株
CK	2.47±0.08b	1.30±0.03b	5.10±0.04b	0.72±0.04b	9.58±0.16b	0.38±0.01b	0.06±0.01b	0.44±0.01b
50Hz	3.83±0.94a	2.04±0.38a	6.04±0.40a	0.82±0.02a	12.74±1.56a	0.41±0.01ab	0.07±0.00a	0.48±0.01a
300Hz	3.15±0.27ab	1.65±0.15ab	5.80±0.22a	0.80±0.03a	11.40±0.61ab	0.43±0.03a	0.08±0.01a	0.51±0.03a

表 3 不同处理对植物根系形态的影响

Table 3 Effects of different treatments on plant root morphology

植物类型	处理组	根系长度/cm	根系表面积/cm ²	根系直径/mm	根系体积/cm ³	根尖数
柳树	CK	1363.43±154.86b	453.72±69.32b	1.15±0.13a	13.06±2.74a	6193.00±1136.34b
	50 Hz	1853.87±262.70a	482.89±82.76ab	1.02±0.13a	11.50±2.32a	7299.00±1151.26ab
	300 Hz	1881.06±54.72a	633.98±142.02a	1.08±0.25a	14.27±6.70a	8183.67±1179.85a
东南景天	CK	291.08±37.13a	36.16±6.10a	0.39±0.03a	0.36±0.08a	3787.50±535.05a
	50 Hz	307.34±57.43a	36.76±4.62a	0.39±0.06a	0.36±0.09a	3724.40±574.26a
	300 Hz	295.13±28.80a	33.97±4.86a	0.38±0.06a	0.33±0.06a	4049.00±570.39a

加而提高，东南景天在 50、300 Hz 电场处理下根系形态指标变化不明显，在 300 Hz 电场处理时东南景天的根系长度、根尖数分别高于对照 1.39%、6.90%。旺盛的根系可能通过增加水分和必需矿物质的吸收速率来促进植物的生长^[32]。电刺激下可以直接影响植物根系的生长。此前有研究表明，外加电场显著增加了禾本科的根直径、根长，在根表面覆盖了大量的根毛，促进养分的吸收^[33]。本研究结果也显示，电场频率处理均提

高了柳树根系形态的指标,从而有利于促进地上部生长。

2.3 电场对植物 Cd 吸收积累的影响

1) 植物 Cd 质量分数。由表 4 可知,施加电场会影响植物各部位对土壤 Cd 的吸收,50 Hz 处理柳树叶片、枝条、树干和根系 Cd 质量分数较对照分别降低 22.16%、29.82% ($P<0.05$)、1.49%、15.91% ($P<0.05$),300 Hz 处理柳树叶片、枝条、树干和根系 Cd 质量分数较对照分别降低 11.38%、17.55% ($P<0.05$)、1.68%、18.58% ($P<0.05$)。在电场作用下东南景天地上部吸收 Cd 能力随着电场频率的增加而显著提升,50、300 Hz 处理东南景天地上部 Cd 质量分数较对照分别增加 43.37%、55.18% ($P<0.05$)。相反,东南景天地下部 Cd 质量分数在 50 Hz 电场下受到明显的抑制,较对照显著降低 31.81%。交流电场的应用使柳树植物各部位 Cd 质量分数下降,这可能因为电场作用刺激柳树根系分泌有机酸,在根系和细胞壁对 Cd 的滞留作用下,限制了柳树对 Cd 的吸收和 Cd 向地上部的运输^[34]。电场作用提高了东南景天地上部的 Cd 质量分数,这是因为电场可以驱动可溶性重金属到达植物根部,同时也增强了金属从根部向地上部分的转运^[35]。交流电场通过以下方式提高植物吸收重金属的能力:电场作用下的电渗透可以引起金属离子的剧烈运动,促使更多的金属离子和络合物向植物根部移动^[36];间歇性的电脉冲使植物膜细胞超极化和去极化,激活了离子通道^[37];适当的电场可以改善土壤的结构、渗透性、氧化还原电位和微生物菌群,提高植物修复效率^[38]。

表 4 不同处理对植物各部位 Cd 质量分数的影响

Table 4 Effects of different treatments on Cd concentrations in different parts of plants $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理组	柳树				东南景天	
	叶片	枝条	树干	根系	地上部	地下部
CK	11.95±0.81a	16.87±1.08a	5.36±1.30a	8.61±0.15a	21.93±2.40b	24.02±1.40a
50 Hz	9.30±1.29a	11.84±0.61b	5.28±0.38a	7.24±0.13b	31.44±6.43ab	16.38±1.85b
300 Hz	10.59±2.71a	13.91±1.41b	5.27±0.73a	7.01±0.32b	34.03±6.19a	21.17±1.29a

2) 植物 Cd 积累量。表 5 和图 3 中植物 Cd 积累量显示,在本研究土壤环境下,2 种植物对电场频率的响应不同。50 Hz 电场可以显著促进柳树的 Cd 积累,在 300 Hz 电场条件下,柳树 Cd 积累量有所增加但不显著。电场作用提高了东南景天的 Cd 积累量,300 Hz 比 50 Hz 处理更能促进东南景天的 Cd 积累量的增加。50、300 Hz 处理植物地上部 Cd 总积累量和植物总 Cd 积累量大致相当,均显著高于 CK 处理。50 Hz 电场处理植物地上部 Cd 总积累和总 Cd 积累量分别显著高于对照 24.04%、23.38%,300 Hz 电场处理植物地上部 Cd 总积累和总 Cd 积累量分别高于显著对照 21.24%、21.56%。试验结果表明,柳树 Cd 主要积累在植物的地上部分,并且 Cd 积累量主要归功于柳树生物量的增加。对柳树而言,交流电场(50 Hz)处理下柳树地上部 Cd 积累量显著高于不加电场处理。但随着电场频率的增加,柳树地上部分 Cd 积累量增加减弱,说明 300 Hz 频率会抑制柳树的地上部分 Cd 积累。对东南景天来讲,地上部 Cd 积累量的增加主要是吸收 Cd 能力的提高。交流电场可促进东南景天生长和重金属的吸收积累^[39],在 50、300 Hz 交流电场条件下,东南景天地上部吸收能力 Cd 和积累量显著提升,并且较高频率(300 Hz)的电场的提升效果更佳,同时,东南景天地下部吸收 Cd 能力和 Cd 积累量在 50 Hz 频率呈下降趋势,而在 300 Hz 交流电场处理下有所回升,这都说明 300 Hz 频率可以在一定程度上加速 Cd 吸收和积累。

表 5 不同处理对植物 Cd 积累量的影响

Table 5 Effects of different treatments on Cd accumulation in plants $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$

处理组	柳树Cd积累量					东南景天Cd积累量	
	叶片	枝条	树干	地上部	根系	地上部	地下部
CK	29.51±2.89a	21.87±1.82a	27.28±6.44a	78.65±3.88b	6.20±0.31a	8.34±0.80b	1.36±0.08b
50 Hz	35.55±10.37a	23.96±3.28a	31.95±3.52a	91.46±16.04a	5.96±0.09a	12.79±2.26ab	1.20±0.12b
300 Hz	32.98±6.39a	22.85±2.19a	30.46±3.28a	86.29±8.28ab	5.58±0.07b	14.60±3.51a	1.70±0.09a

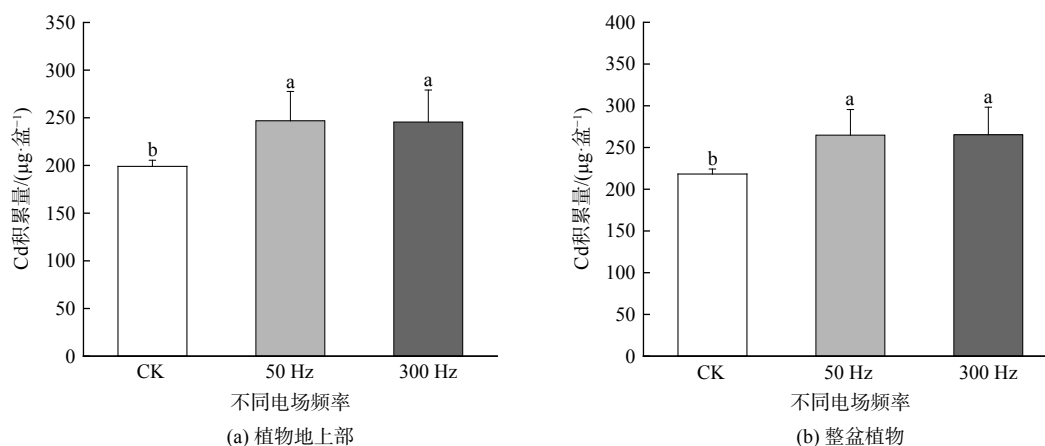


图 3 不同处理对植物 Cd 积累量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on Cd accumulation in plants

2.4 运行成本分析

由上述试验结果得出, 该模式下植物地上部 Cd 积累量约为 $7.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 即可从土壤中带走的重金属 Cd 的量。若农田土壤 Cd 质量分数以 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计, 有效耕作层以 20 cm 计算, 那么农田表层 (0~20 cm) 所含的重金属 Cd 约为 $144 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此, 当本装置应用在实际农田中, 植物种植一茬可以带走污染土壤 5.42% 的 Cd。若农田得到良好的田间管理, 每年种植 3 茬, 连续 3 a 后可使得土壤恢复到安全利用水平。

本试验使用的变频电压器市售价人民币 1 800 元, 设备运行时只消耗电能, 耗电量 0.04 kWh, 电费成本极低。若将该装置应用于农田土壤修复中, 变频电压器、石墨棒、导线及能耗的花费约 $255 000 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。变频电压器的使用寿命为 8 a, 且石墨棒的损耗很小。因此, 本装置可运行多年。变频电压器的单价相对较高, 但随着技术的发展, 变频电压器的价格会逐渐下降, 因此未来成本可能会进一步降低。从安全性来说, 通电时的电流值极小, 并且随着频率的增加, 人体触电的危险程度会下降。交流电场可以影响土壤中的微生物和离子的活动, 从而影响土壤环境, 良好的土壤环境促进植物的生长和修复能力^[40]。结合本研究结果, 电场频率促进柳树和东南景天地上部分吸收和积累 Cd, 缩短了植物修复时间, 降低治理成本, 从而在一些需要快速修复的场景中有广泛的应用前景, 但仍要在实践中进一步探索和应用。

3 结论

1) 在柳树-东南景天混栽的模式下, 交流电场可以增加土壤有效态 Cd 的质量分数, 50、300 Hz 处理的土壤有效态 Cd 质量分数分别是对照的 1.10 倍和 1.35 倍。

2) 适宜的交流电场 (50、300 Hz) 有助于提高柳树和东南景天的生物量生长。随着电场频率的增加, 柳树的生物量呈现先增加后降低的趋势, 而东南景天的生物量则随电场频率的增加而增加。

3) 交流电场 (50、300 Hz) 可以促进柳树和东南景天地上部分吸收积累 Cd, 低频 (50 Hz) 更有利于柳树对土壤 Cd 的吸收积累, 较高频率 (300 Hz) 则更有利于东南景天对土壤 Cd 的吸收积累。

4) 电场联合植物修复装置需要一定的初期成本投入, 但运维成本极低, 对人体较为安全, 修复效率较高, 治理效果较好, 具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 刘志坚, 董元华, 张琇, 等. 卫宁平原农用地土壤重金属污染特征与生态风险研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2216-2224.
- [2] RAI P K, LEE S S, ZHANG M, et al. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management[J]. *Environment International*, 2019, 125: 365-385.
- [3] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [4] 杨滨娟, 黄国勤. 植物种植修复土壤重金属污染的模式、技术与效果综述[J]. 生态科学, 2022, 41(4): 251-256.
- [5] 李亚林, 刘蕾, 段万超, 等. 电动修复技术对土壤中镉迁移的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 6021-6027.
- [6] CHIRAKKARA R A, REDDY K R, CAMESELLE C. Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed contaminated soil[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 181: 179-191.

- [7] 刘玥, 牛婷雨, 李天国, 等. 电动力学辅助植物修复重金属污染土壤的特征机制与机遇[J]. 化工进展, 2020, 39(12): 5252-5265.
- [8] 魏树和, 徐雷, 韩冉, 等. 重金属污染土壤的电动-植物联合修复技术研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 154-160.
- [9] XU L, DAI H, SKUZA L, et al. The effects of different electric fields and electrodes on *Solanum nigrum* L. Cd hyperaccumulation in soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125666.
- [10] 刘波, 陈绩, 马嘉伟, 等. 交流电场和水分对褪色柳-东南景天混栽修复镉污染土壤的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(6): 1238-1244.
- [11] 陈绩. 养分措施管理对交流电场下东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [12] BI R, SCHLAACK M, SIEFERT E, et al. Alternating current electrical field effects on lettuce (*Lactuca sativa*) growing in hydroponic culture with and without cadmium contamination[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2010, 40: 1217-1223.
- [13] 杨光. 外加电场促进土壤重金属化学钝化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [14] HE R R, XI G, LIU K. Alleviating effect of extremely low frequency pulsed electric field on drought damage of maize seedling roots[J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 188: 441-447.
- [15] IWATA S, OKUMURA T, MURAMOTO Y, et al. Influence of AC electric field on plant growth[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 179-182.
- [16] 谢探春, 王国兵, 尹颖, 等. 柳树对镉-砷复合污染土壤的修复潜力与耐受性研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(2): 282-290.
- [17] 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.
- [18] EHRMANN J, RITZ K. Plant: soil interactions in temperate multi-cropping production systems[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1-2): 1-29.
- [19] 倪幸, 李雅倩, 王胜男, 等. 交流电场促进柳树修复镉污染土壤[J]. *环境化学*, 2019, 38(10): 2376-2385.
- [20] MAO Z S, LIU B, FANG X Z, et al. Effects of different fertilizer treatments on AC electric field-assisted phytoremediation efficiency of Cd-contaminated soil by willow and Sedum[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22: 1460-1468.
- [21] 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.
- [22] 潘雄波, 向丽霞, 胡晓辉, 等. 外源亚精胺对盐碱胁迫下番茄幼苗根系线粒体功能的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 491-498.
- [23] 李欣雨, 刘函亦, 薛少琪, 等. 几种绿肥的根系分泌物对土壤锌的活化效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(1): 81-89.
- [24] CAMESELLE C, CHIRAKKARA R A, REDDY R K. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(4): 626-636.
- [25] ELISHA O G, SUSANNE H K, ANJA K, et al. Impact of direct-electric-current on growth and bioactive compounds of African nightshade (*Solanum scabrum* Mill.) plants[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2016, 89: 60-67.
- [26] 曹福亮, 吴家胜, 张往祥. 氮磷钾对银杏苗生长和生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003(1): 63-66.
- [27] XU L, DAI H, SKUZA L, et al. Optimal voltage and treatment time of electric field with assistant *Solanum nigrum* L. cadmium hyperaccumulation in soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126575.
- [28] BI R, SCHLAACK 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*, 2010, 83(3): 318-326.
- [29] 聂斌. 外加直流电场对植物吸收镉的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [30] 那日, 冯璐. 我国静电生物学效应机理研究新进展[J]. *物理*, 2003(2): 87-93.
- [31] 卢守波. 微电场—人工湿地耦合系统处理重金属废水初探[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [32] LEE S, OH M M. Electric Stimulation Promotes Growth, Mineral Uptake, and Antioxidant Accumulation in Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*)[J]. *Bioelectrochemistry*, 2020, 138: 107727.
- [33] SCOPA A, COLACINO C, BARONE LUMAGA M R, et al. Effects of a weak DC electric field on root growth in *Arundo donax* (Poaceae)[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science*, 2009, 59(5): 481-484.
- [34] 王学华, 戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4323-4341.
- [35] LUO J, CAI L, QI S, et al. Influence of direct and alternating current electric fields on efficiency promotion and leaching risk alleviation of chelator assisted phytoremediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 149: 241-247.
- [36] CAMESELLE C, REDDY K R. Development and enhancement of electro-osmotic flow for the removal of contaminants from soils[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 86: 10-22.
- [37] KUBIAK J J, KHANKHANE P J, KLEINGELD P J, et al. An attempt to electrically enhance phytoremediation of arsenic contaminated water[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(3): 259-264.
- [38] ABOUGHALMA H, BI R, SCHLAACK M. Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants[J]. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances and environmental engineering*, 2008, 43(8): 926-933.
- [39] 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.
- [40] 罗茂. 施加低压电场对苜蓿-丛枝菌共生及镉耐受性的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.

(责任编辑: 金曙光)

Effect of AC electric field frequency on remediation of cadmium contaminated soil by willow- *Sedum alfredii* Hance mixed planting

ZHOU Chuikang^{1,2}, MAO Zhansheng^{1,2}, FANG Xianzhi^{1,2}, ZHAO Keli^{1,2}, MA Jiawei^{1,2}, LIU Dan^{1,2}, YE Zhengqian^{1,2,*}

1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China

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

Abstract The single plant uptake method for remediation of cadmium (Cd) contaminated soil is often low efficient, while alternating current (AC) electric field combined with plants can be better for soil Cd contamination. By optimizing parameters such as electric field frequency can improve the mobility of soil Cd, promote plant uptake of soil Cd. A soil pot experiment was conducted to study the effects of (AC) electric field frequency (50 and 300 Hz) on soil physical and chemical properties, Cd availability, plant growth and Cd absorption and accumulation under the mixed planting conditions of willow (*Salix* sp.) and *Sedum alfredii* Hance. Compared to the control treatment (without application of AC electric field), the 300 Hz frequency electric field treatment significantly reduced the soil pH value by 0.13 unit. The increase of electric field frequency significantly improved the availability of Cd in soil, and the soil available Cd concentrations of 300 Hz frequency electric field treatment was significantly higher than that of the control by 35.00%. The plant height, biomass, leaf SPAD value and root morphology parameters of willow and *Sedum alfredii* Hance were all improved when 50 Hz or 300 Hz AC electric field was applied. The AC fields reduced Cd concentrations in all parts of willow and in the underground part of *Sedum alfredii* Hance. The Cd concentrations in the willow leaves, branches, trunks, roots and underground parts of *Sedum alfredii* Hance treated with 50 Hz decreased by 22.16%, 29.82% ($P<0.05$), 1.49%, 15.91% ($P<0.05$) and 31.81% ($P<0.05$), respectively, compared with the control. The Cd concentrations in the aboveground part of *Sedum alfredii* Hance increased by 43.37% and 55.18% ($P<0.05$) in the 50 Hz and 300 Hz treatments, respectively, compared with the control. The increase of electric field frequency improved plant uptake of soil Cd and the efficiency of soil Cd phytoremediation changed with the applied electric field frequency. The total Cd accumulation in the aboveground parts of plants under 50 Hz and 300 Hz AC fields increased significantly by 24.04% and 21.24%, respectively, compared to the control. In terms of the tested two plants, the 50 Hz AC field improved the Cd remediation efficiency of willow more than that of the 300 Hz, and the 300 Hz AC field improved the Cd remediation efficiency of *Sedum alfredii* Hance more more than that of the 50 Hz. The experimental setup had a low cost and high restoration efficiency, providing valuable reference for using electric field frequency to enhance phytoremediation efficiency for Cd, with promising application prospects.

Keywords AC electric field; electric field frequency; phytoremediation; cadmium; soil