

不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响

樊广萍, 姚澄, 周东美, 张振华, 童非, 史高玲, 张维国, 陈未, 李江叶, 刘丽珠, 李云涛, 高岩

引用本文:

樊广萍, 姚澄, 周东美, 等. 不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2669–2680.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0398>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762–2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 347–354 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0916>

不同浓度及不同来源纳米银对伴矿景天生长及重金属吸收的影响研究

王朝阳, 马婷婷, 周通, 李柱, 吴龙华, 周守标, 骆永明

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 250–256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1039>

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103–2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响

王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 李丹, 王贤波, 张奇春

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2292–2298 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0825>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

樊广萍, 姚澄, 周东美, 等. 不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2669–2680.

FAN G P, YAO C, ZHOU D M, et al. Effects of different enhancing agents on the remediation of cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under a two-dimensional electric field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2669–2680.



开放科学 OSID

不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响

樊广萍^{1,2,3}, 姚澄^{2,4}, 周东美⁵, 张振华^{2,3}, 童非^{2,3}, 史高玲^{2,3}, 张维国^{2,3}, 陈未^{2,3}, 李江叶^{2,3}, 刘丽珠^{2,3}, 李云涛^{2,3}, 高岩^{2,3*}

(1. 农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 4. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013; 5. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要:为探讨添加不同增强试剂对二维电场下伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)修复镉(Cd)污染土壤的影响,采用室内盆栽试验,通过构建棒状石墨阳极在花盆四周,垂直网状不锈钢阴极在土壤表层的二维电场,研究了硫粉、菌菇渣溶解性有机质(DOM)和柠檬酸等不同增强试剂及固定直流电场和反转电场等不同电场模式对土壤理化性质、Cd迁移转化、伴矿景天生长和Cd吸收的影响。结果表明:无电场条件下,施加硫粉能使土壤pH下降0.5~1.0个单位,整体提高了土壤有效态Cd含量,并且显著提高了伴矿景天根部对Cd的积累,但显著降低了伴矿景天地上部生物量和地上部Cd积累量;施加DOM和柠檬酸可显著促进伴矿景天生长,但对伴矿景天吸收Cd影响较小,植物地上部Cd积累量分别是不添加增强剂的对照的1.43倍和1.60倍。施加固定直流电场使土壤表层总Cd发生迁移,增加了植物根区土壤总Cd含量,但并未使底层土壤总Cd向表层土壤迁移;反转电场缓解了土壤pH和有效态Cd的变化,使表层土壤总Cd向底层迁移。直流电场与DOM和柠檬酸共同作用时,固定直流电场和反转电场均显著抑制了伴矿景天的生长和对Cd的积累,电场对伴矿景天生长和Cd吸收的影响占主导地位;直流电场与硫粉共同作用时,硫粉对伴矿景天生长和Cd吸收的影响起主要作用。整体上,固定直流电场相较反转电场可增加植物对Cd的吸收,反转电场相较固定直流电场能增加植物生物量。固定直流电场与硫粉共同作用可显著增加伴矿景天根系Cd浓度,其对地上部的Cd吸收也有促进作用。研究表明,在利用伴矿景天修复碱性污染土壤时,电场+硫粉处理可作为一种有效的强化措施,但是硫粉的施用量需要进一步优化。

关键词:增强试剂;二维电场;电场模式;伴矿景天;Cd吸收

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)12-2669-12 doi:10.11654/jaes.2021-0398

Effects of different enhancing agents on the remediation of cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under a two-dimensional electric field

FAN Guangping^{1,2,3}, YAO Cheng^{2,4}, ZHOU Dongmei⁵, ZHANG Zhenhua^{2,3}, TONG Fei^{2,3}, SHI Gaoling^{2,3}, ZHANG Weiguo^{2,3}, CHEN Wei^{2,3}, LI Jiangye^{2,3}, LIU Lizhu^{2,3}, LI Yuntao^{2,3}, GAO Yan^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin

收稿日期:2021-04-03 录用日期:2021-07-05

作者简介:樊广萍(1985—),女,博士,助理研究员,主要从事污染土壤的电动修复研究。E-mail:fanguangping@jaas.ac.cn

*通信作者:高岩 E-mail:ygao@jaas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41907114);中国博士后科学基金项目(2018M632252);农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金项目(18nybdhj-3)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41907114); China Postdoctoral Science Foundation(2018M632252); Open Fund of Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Agro-Environment Protection Institution, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (18nybdhj-3)

Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Agro-Environment Protection Institution, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 4. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 5. Nanjing University, School of the Environment, State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, Nanjing 210023, China)

Abstract: To study the effects of different enhancing agents on the remediation of cadmium (Cd) contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under a two-dimensional (2D) electric field, the 2D electric field of a graphite rod vertical anode in the four corners of a soil matrix and a vertical, reticular stainless steel cathode on the soil surface was built, and the effects of sulfur powder, mushroom residue dissolved organic matter (DOM) and citric acid, as well as two different electric field modes, i.e., fixed direct current (DC) electric field and electric field reversion, on soil properties, total and bioavailable Cd contents, growth of *S. plumbizincicola*, and Cd uptake were studied by pot experiment in the laboratory. The study produced several interesting results: Under the condition of no electric field, applying sulfur powder reduced the soil pH by 0.5~1.0 unit, increased the bioavailable Cd content, and significantly increased the accumulation of Cd in roots; however, it significantly reduced the biomass of shoots and Cd accumulation in shoot. The addition of DOM and citric acid significantly promoted the growth of *S. plumbizincicola*, but it had little effect on Cd uptake by *S. plumbizincicola*, and the accumulation of Cd in the shoots of the plant was 1.43 times (for DOM) and 1.60 times (for citric acid) the accumulation of the control. The application of the fixed DC electric field caused the total Cd in surface soil to migrate and increased the total Cd content in the root zone soil, but it did not drive total Cd migration from the bottom layer to the soil surface. Electric field reversion alleviated the change of soil pH and bioavailable Cd, but it caused the total Cd in the surface soil to migrate to the bottom layer. Under the condition of the DC electric field with DOM and citric acid, both the fixed DC electric field and the reversed electric field significantly inhibited the growth and Cd uptake of *S. plumbizincicola*, and the effect of the electric field was dominant. When the electric field and sulfur powder acted together, the sulfur powder played a major role in the growth and Cd uptake of *S. plumbizincicola*. Overall, the fixed DC electric field increased the uptake of Cd by the plants relative to the reversed electric field, and the reversed electric field increased the biomass of plants relative to the fixed DC electric field. The fixed DC electric field with sulfur powder significantly increased Cd concentration in roots of *S. plumbizincicola* and also promoted Cd uptake in shoots. Therefore, the electric field plus sulfur powder treatment can be used as an effective strengthening measure in the remediation of alkaline Cd contaminated soil by *S. plumbizincicola*, but the application concentration of the sulfur powder needs to be optimized further.

Keywords: enhancing agent; two-dimensional electric field; electric field pattern; *Sedum plumbizincicola*; cadmium uptake

镉(Cd)是我国农田土壤中毒性最强的污染物之一。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤Cd的点位超标率达7%,形势十分严峻。近年来,Cd污染土壤的修复已受到国内外学者的广泛关注。与土壤重金属污染的物理、化学修复技术相比,植物修复技术以其环境友好、绿色经济且可大面积进行原位修复等优点而被认为是最具前景的修复方式。伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是一种锌/镉(Zn/Cd)超积累植物,其对土壤中的Cd具有较强的提取能力^[1-3]。但伴矿景天根系较浅,仅能富集根系范围内的重金属,且其修复效率受重金属有效性的限制^[4-5]。因此,采取有效措施,增加土壤重金属的有效态含量是提高植物修复效率的关键。

农艺、化学辅助等措施可增加超积累植物对土壤中重金属的吸收积累,提高对重金属污染土壤的修复效率。已有研究表明,施加有机酸和有机物料等均可提高超积累植物对土壤中重金属的吸收^[6-7]。吴孟君

等^[6]通过比较乙二胺四乙酸二钠(EDTA)、茶皂素和柠檬酸等不同活化剂对伴矿景天修复重金属Cd效率的影响,发现3 mmol·L⁻¹ EDTA或10 mmol·L⁻¹柠檬酸可使伴矿景天的修复效率提高2~3倍。邓月强等^[7]的研究发现,施用水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪和水溶性有机肥等有机物料可显著促进伴矿景天生长,其中施用3%水溶性有机肥可使土壤有效态Cd含量较不加外源物质的对照提高50.0%,并有效提高了Cd污染土壤的修复效率。另外,施加含硫物质可通过降低土壤pH值提高土壤中重金属的活性,从而提高植物对重金属的萃取效率^[8-9]。有研究表明,施用硫粉可以使石灰性土壤和中性土壤中伴矿景天地上部Cd浓度分别增加1.7~5.5倍和1.7~2.3倍^[9]。

近年来,将电动修复技术与植物修复技术相结合修复重金属污染土壤的新技术逐渐建立,该方法通过在污染土壤中施加低强度的电场,利用电场对土壤重金属的活化和迁移,提高植物对重金属的吸收积累,

从而达到提高污染土壤修复效率的目的^[10-11]。在电动-植物修复过程中,电极的布置方式和电场模式会对植物富集重金属产生影响。在电动-植物联合修复中,电动修复的关键作用是使土壤深处的重金属通过电迁移和电渗流向植物根部迁移,从而增加植物对重金属的可及性,使利用根系较短的植物进行修复成为可能。但目前研究较多的水平电场无法实现重金属在土层垂直方向上的迁移^[12]。为了解决深层土壤重金属的修复问题,PUTRA等^[13]构建了二维电场,发现二维电场可促进重金属从深层土壤向植物根系迁移,醋酸辅助二维电场增加了早熟禾的生物量,并使早熟禾对土壤中铅的富集系数和转移系数分别提高了1.44倍和1.83倍。LUO等^[14]开展了二维电场与蓝桉联合修复贵屿电子垃圾拆解地污染土壤的场地试验,结果表明2~10 V的直流电促进了蓝桉对多种重金属的富集,直流电较交流电促进了重金属在土壤表层的集聚,且降低了土壤中重金属的淋溶风险。基于不同植物对电场的响应程度不同,且关于超积累植物与电场联合修复的研究相对较少,本课题组前期研究了二维电场-伴矿景天联合修复Cd污染土壤的效果,通过构建阳极在花盆四个角落,网状不锈钢阴极水平放置在土壤表面的二维电场,发现高强度二维电场可以促进土壤深处Cd向表层迁移,但是阴极位于土壤表层,严重抑制了伴矿景天的生长,并且降低了表层土壤Cd的有效性^[15]。

综上,施加添加剂可以进一步提高土壤中重金属的迁移性和生物有效性,在增强试剂-电动-植物联合修复过程中,增强试剂与不同电场模式均会对植物生长和吸收重金属产生影响,但其影响主导因素不明。为此,本研究在前期研究结果的基础上,针对阴极电极水平放置于土壤表层对伴矿景天生长和Cd有效性的不利影响,构建了阴极垂直放置于土壤表层,阳极位于土壤四周的二维电场,考察了硫粉、菌菇渣溶解性有机质(DOM)、柠檬酸等不同增强试剂以及固定直流电场和反转电场等不同电场模式对土壤Cd迁移转化以及伴矿景天生长和吸收Cd的影响,以期为提高伴矿景天的修复效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*),采自湖南省湘潭县丰山育苗基地。供试土壤采自江苏省张家港市某河道附近,该农田为施加河道污染底泥

形成的Cd污染土壤,土壤类型为潮土。取表层0~20 cm土壤,经风干去除杂物后,过孔径2 mm筛备用。土壤基本理化性质如表1所示。土壤总Cd含量为130 mg·kg⁻¹,远超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险管制值(4.0 mg·kg⁻¹)。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soil used

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
pH	7.54	有效态 K/(mg·kg ⁻¹)	81.5
电导率/(μS·cm ⁻¹)	865	总 Cu/(mg·kg ⁻¹)	86.2
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	24.8	总 Zn/(mg·kg ⁻¹)	147
有机质/(g·kg ⁻¹)	17.8	总 Pb/(mg·kg ⁻¹)	265
总 N/(g·kg ⁻¹)	0.683	总 Cr/(mg·kg ⁻¹)	28.4
总 P/(g·kg ⁻¹)	0.993	总 As/(mg·kg ⁻¹)	9.30
总 K/(g·kg ⁻¹)	14.8	总 Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.182
有效态 N/(mg·kg ⁻¹)	88.1	总 Cd/(mg·kg ⁻¹)	130
有效态 P/(mg·kg ⁻¹)	87.1		

供试增强试剂分别选用硫粉(升华硫)、菌菇渣溶解性有机质(DOM)和柠檬酸。菌菇渣DOM制备方法为:取适量姬菇渣风干后粉碎,过0.2 mm筛,按固液比1:20加入去离子水,并于20℃恒温振荡24 h(200 r·min⁻¹),放入25℃恒温培养箱发酵一周后,离心20 min(10 000 r·min⁻¹),取上清液经0.45 μm微孔滤膜抽气过滤,提取的滤液即为DOM,将其置于4℃冰箱储存备用^[16]。本研究提取的菌菇渣DOM电导率1.822 mS·cm⁻¹,pH值6.71,总有机碳1 330 mg·L⁻¹。

1.2 试验设计

本研究采用人工培养室盆栽试验方式,试验时间为2019年12月10日—2020年1月21日。试验所用塑料盆规格为上直径23 cm、下直径18 cm、高22 cm,底部有孔,放置于托盘上。每盆装土6.65 kg,分别加入0.43 g·kg⁻¹尿素(N含量46.7%)、0.26 g·kg⁻¹磷酸二氢钾和0.36 g·kg⁻¹硫酸钾作为底肥,并根据处理设计分别加入硫粉、菌菇渣DOM和柠檬酸,其中硫粉添加量为2 g·kg⁻¹^[9],直接将硫粉加入土壤拌匀后装入塑料盆;菌菇渣DOM添加量(以C计)为200 mg·kg⁻¹^[16],将DOM溶液每盆稀释1 L后均匀加入土壤中;柠檬酸的添加量为10 mmol·kg⁻¹^[17],将1 L柠檬酸溶液均匀加入土壤中。

每种增强试剂分别设置施加固定直流电场和反转电场的处理,以不施加电场为对照(CK),每个处理

设置3个重复,详见表2。试验装置如图1所示,施加电场处理4个石墨电极(直径6 mm、长25 cm)分别垂直插入塑料盆的4个角部,不锈钢网状电极(长15 cm、宽10 cm)垂直插入塑料盆中间位置,石墨电极与不锈钢网状电极之间的距离为8 cm。石墨电极与直流电源的正极相连,不锈钢网状电极与直流电源的负极相连。2019年12月10日,选用大小相近、长势一致的伴矿景天(*S. plumbizincicola*)幼苗进行扦插,每盆8株,种植两行,株距4 cm,行距8 cm。施加电场处理的伴矿景天种植于石墨电极和不锈钢网状电极之间。在伴矿景天生长15 d后,进行通电处理,试验周期为30 d。设置直流电源电压为10 V,每日通电8 h,反转电场的处理每7 d交换电场方向(分别于第8 d、第15 d和第22 d交换正负极方向)。在伴矿景天生长过程中,每日通过称重法浇水以使土壤含水量保持在田间持水量的70%左右。通电处理中每日不定期测试土壤中电流大小。

1.3 样品采集与处理

2020年1月21日收获伴矿景天全部植株并采集土壤样品。伴矿景天收获后分为地上部和根部,用自来水冲洗干净后,再用去离子水反复冲洗,吸水纸吸干表面水后置于烘箱105℃杀青30 min,65℃烘干至质量恒定,测定干物质量。再用玛瑙研钵磨碎,过60目(孔径0.25 mm)筛后供分析测试。土壤样品从上到下平均分为四层,第一层0~5 cm;第二层5~10 cm;第三层10~15 cm;第四层15~20 cm,每层分为5个区域(图1)。采集的土样经自然风干,磨细,过孔径0.85 mm筛后用于测定土壤pH、电导率、总Cd含量和有效态Cd含量等指标。

1.4 测试指标及方法

土壤(土水比1:2.5)及菌菇渣DOM原液pH采用pH计(梅特勒托利多,FE28,德国)测定,电导率采用电导率仪测定。菌菇渣DOM有机碳含量采用总有机碳分析仪(TOC, MultiN/C3100,德国)测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全钾含量采用火焰光度法测定;全磷含量采用硫酸-高氯酸消解,钼锑抗比色法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效态磷采用碳酸氢钠提取,钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵提取法测定。土壤有效态Cd采用DTPA(二乙基三胺五乙酸)浸提法测定;土壤重金属含量测定采用王水消解(GB/T 22105.2—2008和HJ 803—2016),伴矿景天植株中Cd含量采用HNO₃-HClO₄(体积比5:1)消解。土壤消化液中总As和总Hg含量采用原子荧光光谱仪

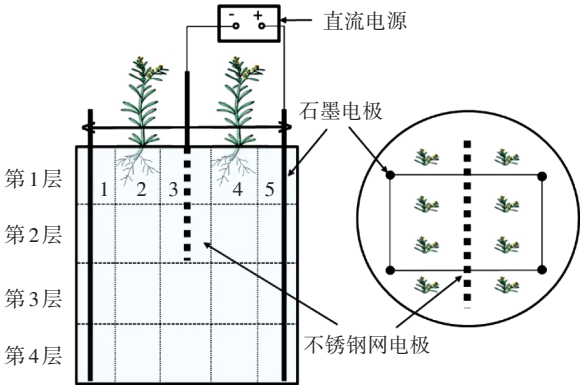


图1 二维电场-伴矿景天联合修复示意图
Figure 1 Schematic diagram of two dimensional electric field coupled *Sedum plumbizincicola* system

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

编号 No.	增强试剂 Enhancing agent	电场强度 Electric field intensity/V	电场方向 Electric field direction	通电时间 Application time/(h·d ⁻¹)	周期 Duration/d
1	无(CK)	—	—	—	30
2	2 g·kg ⁻¹ 硫粉	—	—	—	30
3	200 mg·kg ⁻¹ 菌菇渣DOM(以C计)	—	—	—	30
4	10 mmol·kg ⁻¹ 柠檬酸	—	—	—	30
5	无(CK)	10	固定	8	30
6	2 g·kg ⁻¹ 硫粉	10	固定	8	30
7	200 mg·kg ⁻¹ 菌菇渣DOM(以C计)	10	固定	8	30
8	10 mmol·kg ⁻¹ 柠檬酸	10	固定	8	30
9	无(CK)	10	每7日反转电场	8	30
10	2 g·kg ⁻¹ 硫粉	10	每7日反转电场	8	30
11	200 mg·kg ⁻¹ 菌菇渣DOM(以C计)	10	每7日反转电场	8	30
12	10 mmol·kg ⁻¹ 柠檬酸	10	每7日反转电场	8	30

测定(海光, AFS8510, 中国), 其他重金属(Cd、Pb、Cr、Cu、Zn)和植株消化液及土壤有效态提取液中Cd含量采用原子吸收光谱仪(海光, GSK-80, 中国)测定。

1.5 数据处理

采用Excel 2016和Origin 2018进行数据处理和做图, 使用SPSS 20.0对数据进行方差分析, Duncan多重比较法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同增强试剂和电场模式对电流变化的影响

图2为不同电场施加方式下增强试剂对电流的影响。施加固定直流电场处理中, 电流初始时较高, 随着试验的进行电流迅速降低并趋于稳定, 且各处理中电流呈现周期性的波动。添加不同的增强试剂对电流的影响较大, 各处理中电流大小表现为硫粉>DOM>CK>柠檬酸。其中加入硫粉的处理电流保持在60~100 mA之间, 显著高于其他处理(电流40~70 mA)。周期性的反转电场使各处理中电流相应出现了较大的波动, 各处理中电流变化呈现一定的规律性。未反转电场之前(7 d之前), 增强试剂对电流的影响与固定直流电场一致, 第1次(第8 d)和第3次(第22 d)反转电场能使土壤中电流增大, 第2次(第15 d)反转电场使土壤中电流急剧下降。其中, 加入硫粉的处理电流随电场方向改变的变化幅度最大, 即第8 d和第22 d反转电场以后电流的升高最明显, 而第15 d反转电场电流的降低也最明显。

2.2 不同增强试剂和电场模式处理后土壤不同区域pH和电导率的变化

图3(a)为试验结束后土壤pH的分布。在不施加电场的条件下, 与CK相比, 硫粉的加入有效降低了土壤pH, 使土壤pH降低0.5~1.0个单位。施加DOM使

土壤pH略有降低, 土壤pH下降0.1~0.5个单位。而加入柠檬酸反而使土壤pH略有升高, 升高了-0.1~0.4个单位。施加硫粉的处理各土层pH变化较小, 其他处理土壤pH纵向分布表现为第1层<第2层<第3层<第4层。施加固定直流电场和反转电场时, 添加各种增强试剂对土壤pH变化的影响整体上与未加电场一致。施加固定直流电场使各处理中靠近两端的阳极土壤pH降低, 位于中间的阴极土壤pH升高, 土壤pH呈现从阳极向阴极逐渐升高的趋势。由于阴极垂直放置于土壤表层(第1、2层), 土壤第1、2层的变化要强于第3、4层。反转电场使各处理中第3、4层土壤pH与无电场条件下相比有所升高, 且高于第1、2层土壤pH, 各处理中第1、2层土壤pH分布与固定直流电场处理相反, 呈现从阴极(两端)到阳极(中间)降低的趋势, 且变化幅度相对较小。与未加电场处理相比, 施加硫粉的处理中, 施加固定直流电场和反转电场均降低了植物根系(第1层第2和4区域)土壤pH。而施加DOM和柠檬酸的处理中, 直流电场和反转电场均使植物根系土壤pH有所增加。

试验结束后土壤电导率的分布如图3(b)所示。土壤电导率的分布与土壤pH基本一致, 呈现土壤pH越低, 土壤电导率越高的趋势。无论是否施加电场, 施加硫粉均显著提高了各层土壤的电导率。各处理中, 种植伴矿景天的第1层土壤电导率均高于其他土层。在电场作用下, 第1层土壤的电导率变化幅度最大, 表现为阳极电导率升高, 阴极电导率降低。

2.3 不同增强试剂和电场模式处理后土壤Cd总量及有效态含量的变化

图4(a)为试验结束后土壤总Cd含量的分布。无电场条件下, 添加各种增强试剂的处理中, 土壤各部分Cd含量分布相对均匀。固定直流电场作用下,

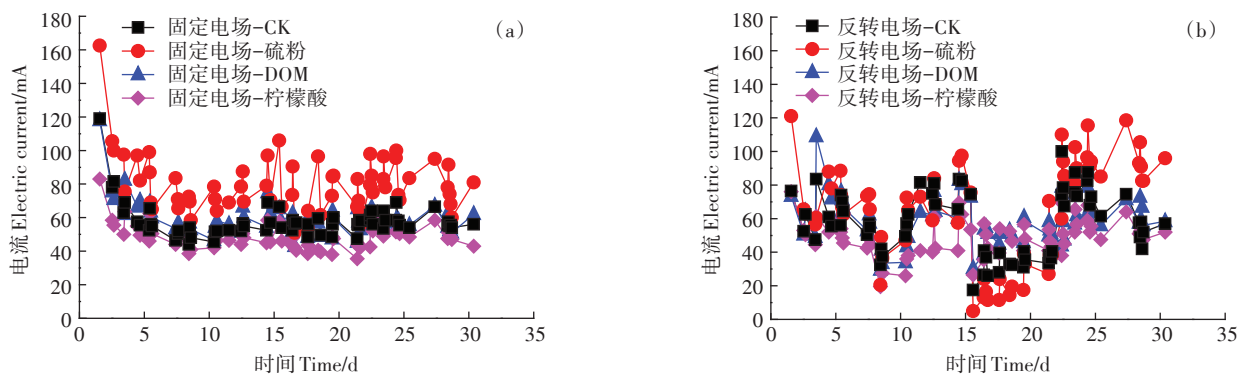


图2 不同增强试剂和电场模式对电流变化的影响

Figure 2 Effects of different enhancing agents and electric field modes on the variation of electric current

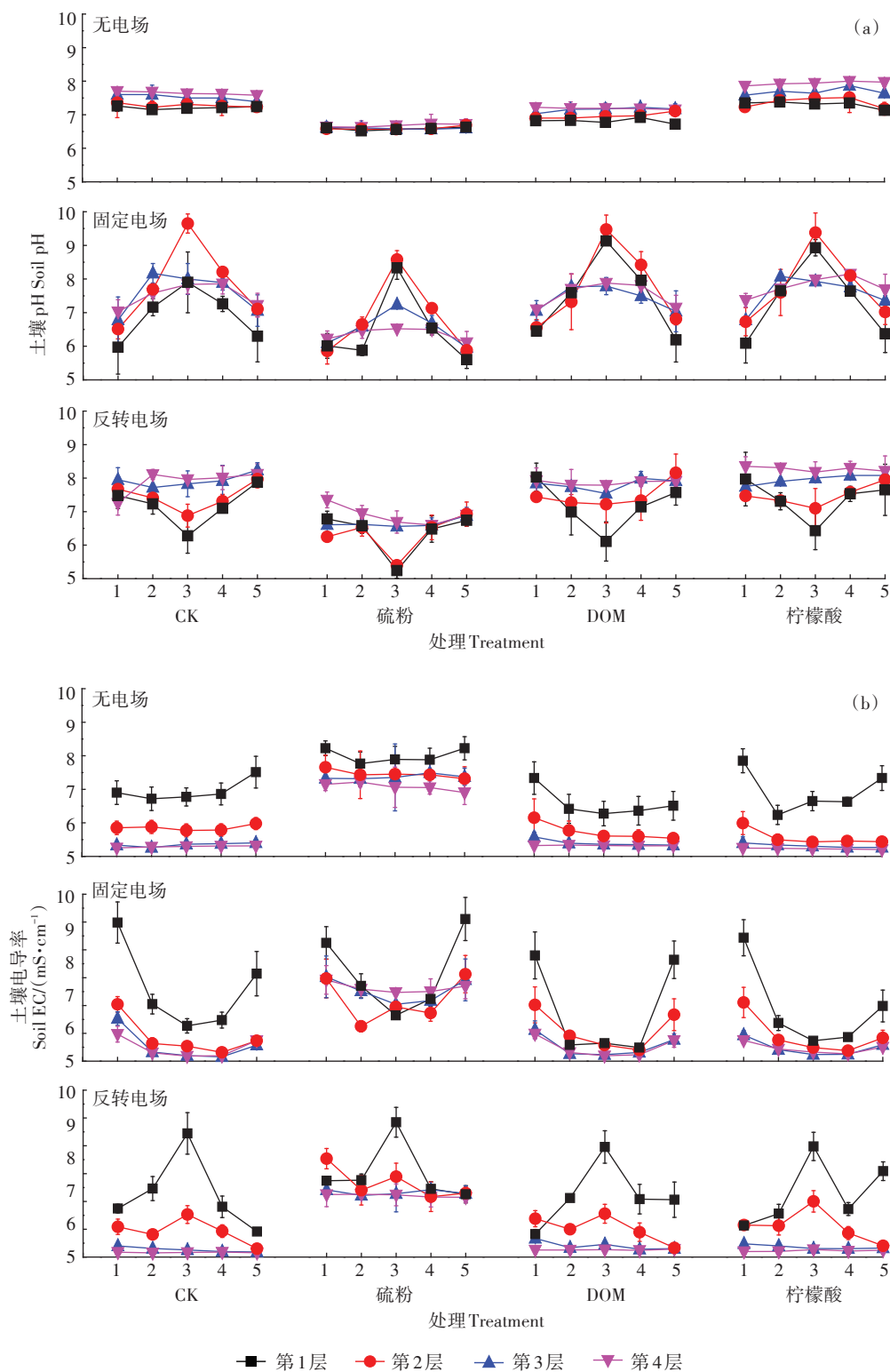


图3 不同增强试剂和电场模式处理后土壤pH和电导率的分布

Figure 3 Soil pH and EC profiles after different enhancing agents and electric field modes treatments

CK、施加硫粉和DOM的处理中,表层土壤(第1、2层)Cd从阳极向阴极迁移,土壤Cd含量从阳极(两端)到阴极(中间)逐渐升高,使植物生长区域(第2和第4区

域)Cd的总量有所升高。第3、4层土壤中Cd向表层迁移的趋势不明显。加入柠檬酸的处理中,土壤中Cd的迁移规律与其他处理不一致,特别是第1层土壤,

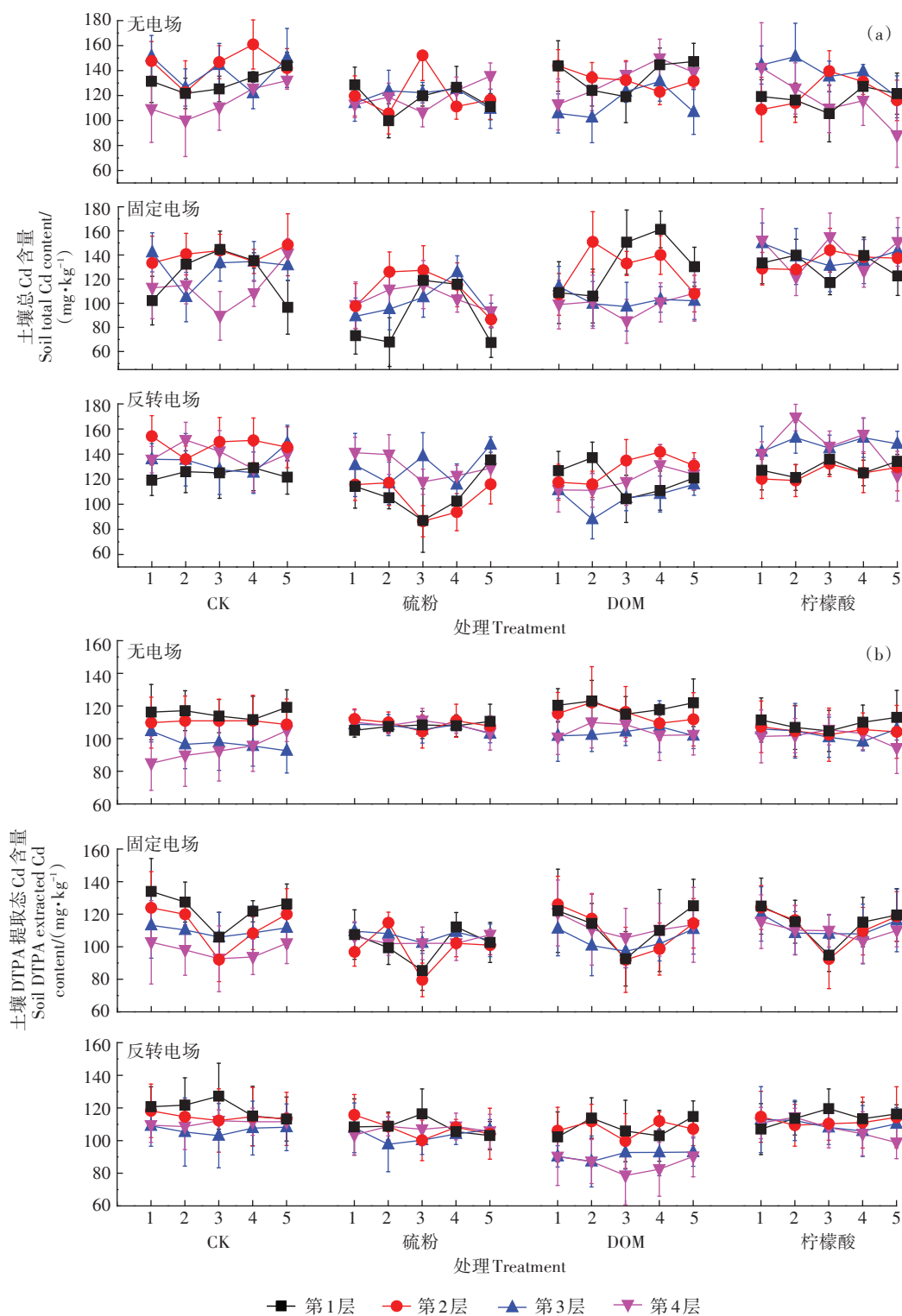


图4 不同增强试剂和电场模式处理后土壤总Cd和有效态Cd含量

Figure 4 Total Cd and DTPA extracted Cd content profiles after different enhancing agents and electric field modes treatments

土壤Cd有从阴极(中间)向阳极(两端)迁移的趋势。反转电场使土壤各层Cd含量的分布趋于均匀,经过3次反转电场后,Cd的迁移趋势与施加固定直流电场的处理相反。另外,反转电场使表层土壤Cd含量有所

降低,第3、4层Cd含量有所升高,表明反转电场使土壤Cd发生了向下迁移。总体来看,施加电场促进了土壤总Cd的迁移,同时提高了植物生长区域总Cd含量,反转电场使各处理中Cd由表层向底层迁移。

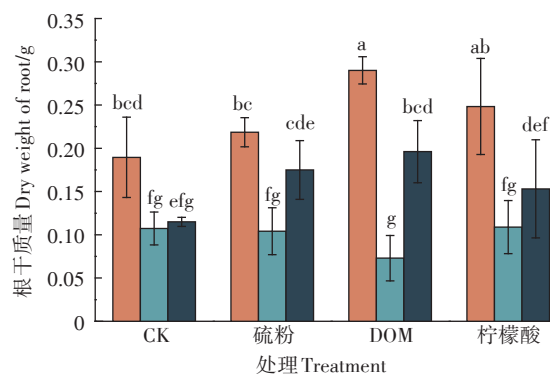
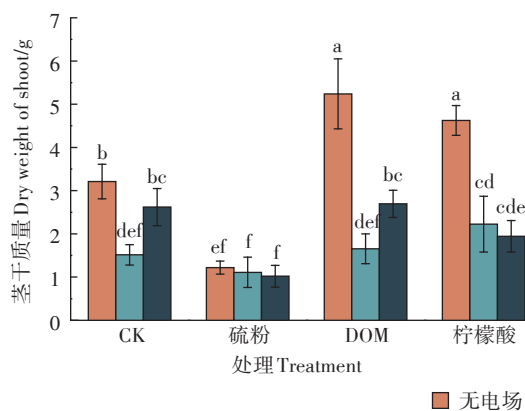
土壤有效态Cd含量的分布如图4(b)所示。土壤有效态Cd含量初始为 $110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。未施加电场条件下,与CK相比,施加DOM使各层土壤有效态Cd含量有所升高。施加硫粉和柠檬酸的处理中表层土壤有效态Cd含量低于DOM和CK。但施加硫粉使各土层有效态Cd含量均维持在较高的水平,且各层之间差异较小,说明施加硫粉使土壤有效态Cd含量整体上有所升高。其余处理中,各层有效态Cd含量均表现为第1层>第2层>第3层~第4层。施加固定直流电场条件下,与未加电场相比,CK、DOM和柠檬酸处理中阳极土壤有效态Cd含量升高,阴极土壤有效态Cd含量降低,表层土壤有效态Cd从阳极向阴极逐渐降低,其中第1、2层的变化较明显。反转电场处理中,3次反转电场缓解了土壤有效态Cd的变化,使土壤有效态Cd的分布与未加电场处理一致。而对于植物根系生长区域(第1层第2和4区域),施加固定直流电场使CK和柠檬酸处理中有效态Cd含量有所增加,使DOM处理中有效态Cd含量有所降低。

2.4 不同增强试剂和电场模式对伴矿景天生长和吸收Cd的影响

图5为各处理伴矿景天地上部和根部的生物量。未加电场的处理中,施加DOM和柠檬酸显著提高了伴矿景天生物量($P<0.05$),其中施加DOM使伴矿景天地上部和根部干质量分别比CK增加了63%和53%,施加柠檬酸分别增加了44%和31%;施加硫粉显著降低了伴矿景天地上部生物量($P<0.05$),较CK降低62%,但对伴矿景天根部生物量影响不显著。固定直流电场显著抑制了伴矿景天生长,与未加电场处理相比,除了施加硫粉外,其余处理均显著降低了伴矿景天地上

部和根部的生物量。说明固定直流电场和硫粉共同作用下,硫粉对伴矿景天地上部生长的抑制作用占主导地位,而固定直流电场与DOM和柠檬酸共同作用时,电场对伴矿景天生长的抑制起主要作用。相比直流电场,反转电场处理增加了CK、DOM处理中伴矿景天地上部的生物量和硫粉、DOM、柠檬酸处理地下部的生物量,但其生物量仍低于未加电场的处理。整体上,各处理中生物量表现为无电场>反转电场>固定直流电场,施加电场显著抑制了伴矿景天的生长,反转电场处理伴矿景天生物量高于固定直流电场处理,但低于未加电场处理。

图6为各处理伴矿景天地上部和根部Cd浓度。未加电场的处理中,与CK相比,施加不同增强试剂对伴矿景天地上部和根部Cd含量影响较小,只有施加硫粉显著提高了伴矿景天根系对Cd的吸收,其根部Cd浓度是CK处理的1.57倍。固定直流电场与硫粉共同作用提高了伴矿景天地上部和根部Cd含量,分别是固定电场作用下CK处理的1.29倍($P<0.05$)和1.77倍($P<0.05$),是无电场作用下对照处理的1.18倍($P>0.05$)和2.82倍($P<0.05$)。与无电场CK相比,固定直流电场和DOM及柠檬酸共同作用显著降低了伴矿景天地上部Cd浓度,但对地下部Cd浓度无显著影响。说明电场与DOM和柠檬酸共同作用时,电场对伴矿景天吸收Cd的影响起主导作用;电场与硫粉共同作用时,硫粉对伴矿景天吸收Cd起主导作用。与固定直流电场相比,反转电场与增强试剂共同作用进一步降低了各处理中伴矿景天地上部和根系对Cd的吸收。整体上,除了施加硫粉的处理,其余处理中固定直流电场和反转电场均抑制了伴矿景天地上部对



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). The same below

图5 不同增强试剂和电场模式对伴矿景天地上部和地下部生物量的影响

Figure 5 Effects of different enhancing agents and electric field modes on the biomass of *Sedum plumbizincicola*

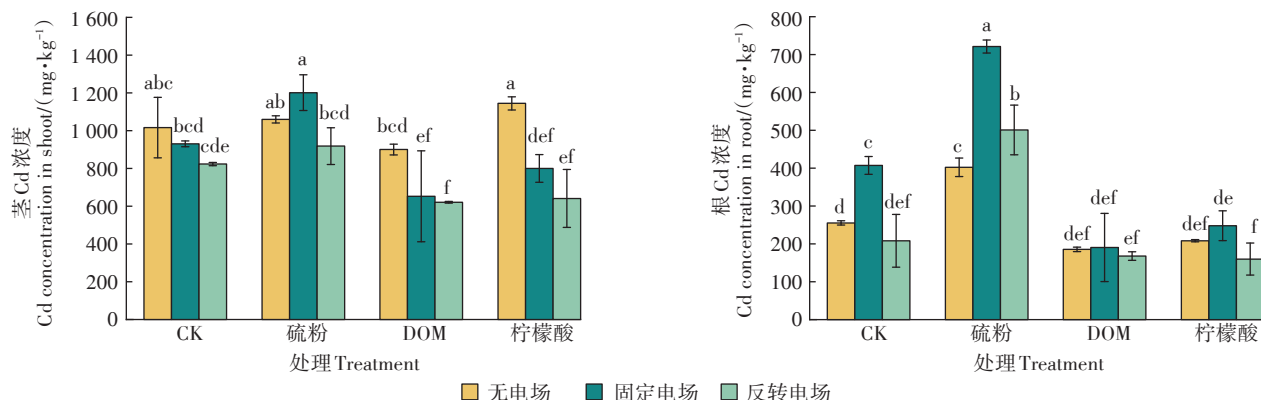


图6 不同增强试剂和电场模式对伴矿景天地上部和地下部Cd浓度的影响

Figure 6 Effects of different enhancing agents and electric field modes on the Cd content in shoots and roots of *Sedum plumbizincicola*

Cd的吸收,伴矿景天地上部Cd浓度表现为无电场>固定直流电场>反转电场。固定直流电场与未加电场处理相比促进了伴矿景天根系对Cd的吸收,根系Cd浓度表现为固定直流电场>无电场>反转电场。

图7为各处理伴矿景天地上部和地下部对Cd的积累量。未加电场的处理中,施加DOM和柠檬酸显著促进了伴矿景天地上部对Cd的积累,其地上部Cd积累量分别是CK处理的1.43倍和1.60倍,而地下部对Cd的积累量与CK相比无显著差异。施加硫粉显著提高了伴矿景天地下部对Cd的积累,其对Cd的积累量是CK处理的1.80倍,但地上部生物量的减少导致地上部对Cd的积累显著降低。电场与硫粉共同作用下,电场对伴矿景天积累Cd无显著影响。其余处理中,固定直流电场和反转电场处理均显著降低了伴矿景天地上部对Cd的积累,但两者之间无显著差异。总体来看,未加电场条件下,施加DOM和柠檬酸可显著提高伴矿景天Cd积累量;施加固定直流电场和反转

电场均显著抑制了伴矿景天地上部对Cd的积累量;有无电场条件下,施加硫粉均显著提高了伴矿景天根部对Cd的积累,显著抑制了地上部对Cd的积累。

3 讨论

3.1 不同增强试剂和电场模式对电流变化的影响

电动过程中电流的大小可以表征电动-植物修复过程中土壤离子浓度的变化^[18]。在本研究中,电流随时间逐渐减弱可能与土壤离子种类的减少和电动过程中其他增加土壤电阻的过程(如土壤含水率、孔隙度、温度的变化以及电极上的电化学反应)有关^[19]。本研究发现灌水过程会使体系电流增大,随后逐渐降低。灌水前后电流出现的周期性波动与电极上水的电解有关,灌水过程中土壤含水率升高可使电极上水的电解作用增强,从而使电流增大^[20]。本研究发现施加硫粉使电流增大,这主要与土壤pH的降低有关。大量研究表明,施加硫粉能降低土壤pH,从而促进土

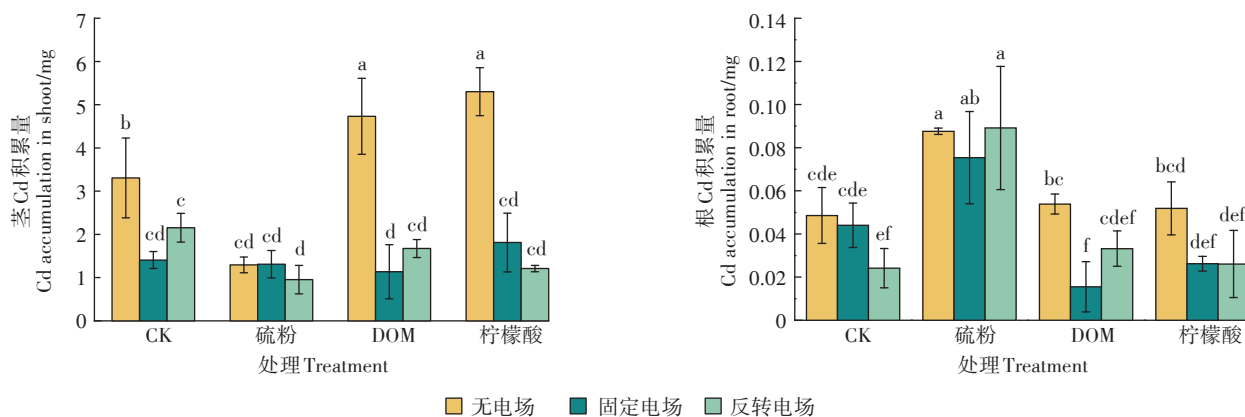


图7 不同增强试剂和电场模式对伴矿景天地上部和地下部Cd积累量的影响

Figure 7 Effects of different enhancing agents and electric field modes on the Cd accumulation in shoots and roots of *Sedum plumbizincicola*

壤中离子的溶出^[18-9,21]。

3.2 不同增强试剂和电场模式对土壤性质和Cd迁移转化的影响

土壤pH是影响土壤重金属活性及分布的重要环境因子,其在决定重金属形态、有效性和活化及迁移方面起着重要作用^[22]。在本研究中,不同增强试剂和电场模式对土壤pH和Cd的有效性产生了不同的影响。

无论是否施加电场,施加硫粉均有效降低了土壤pH,这与大部分研究结果一致。硫氧化过程会释放质子,促进土壤pH的降低^[23]。魏帅^[24]的研究表明,硫肥处理显著降低东南景天根际土壤pH。AZEEZ等^[21]的研究也表明,元素硫通过降低土壤的pH提高了碱性污染土壤中重金属的活性,从而提高了非洲野生向日葵对Cd等重金属的萃取效率。施加硫粉未增加表层土壤Cd的有效性,这与前人的研究结果也基本一致。魏帅^[24]的研究也表明,施硫使土壤有效态Cd含量升高,致使东南景天对Cd的吸收量增加,进而导致根际土壤总Cd和有效态Cd含量降低。本研究发现施加DOM使土壤pH有所降低,同时增加了各层土壤有效态Cd含量。DOM主要通过和重金属形成有机络合物,提高土壤中重金属的溶解性及生物有效性,从而有效活化土壤中的重金属^[16]。本研究发现施加柠檬酸使土壤pH略有升高,这与多数研究结果不一致。大多数研究表明施加柠檬酸会使土壤pH降低,进而增加土壤重金属的有效性,而本研究发现施加柠檬酸使土壤pH略有上升,且降低了表层土壤有效态Cd含量,这可能与土壤较高的缓冲性能有关(供试土壤pH 7.54,呈弱碱性)^[16,25]。同时,施加柠檬酸使伴矿景天对Cd的吸收量增加,这也会导致表层土壤有效态Cd的降低。另外,本研究中表层土壤pH低于深层土壤,主要是因为伴矿景天根系会分泌有机酸等酸性物质,进而通过降低根际土壤的pH活化土壤中的重金属^[26]。这一结果也可由表层土壤Cd有效性升高来验证。

施加直流电场会改变土壤pH、Cd总量和有效态的分布。为了实现土壤深处Cd向植物根系迁移,本研究设置了阳极在土壤深处,阴极在植物根系生长层的二维电场。施加反转电场是为了缓解直流电场条件下阳极和阴极土壤pH剧烈变化对植物生长产生的不利影响。由于土壤中Cd初始含量较高,并未发现深层Cd明显向表层迁移,这可能与试验中所用电极面积较小致使土壤中Cd的迁移速率较慢有关。本课题

组之前的研究表明,15 V的电压梯度能促进土壤深处Cd向表层迁移^[15]。反转电场显著促进了Cd由表层向底层的迁移,与本研究的预期相反。这主要是因为反转电场处理的土壤中,Cd被周期性地活化和固定,从而容易随重力水向下淋溶。另外,最后一次电场处理中,Cd²⁺电迁移的方向和重力水的方向一致,都是从表层向底层,从而导致Cd向土壤底层的迁移较明显。因此,反转电场的频次需要进一步调整。本研究还发现,土壤中总Cd从阳极迁移到阴极的过程中会导致植物根区土壤总Cd有所上升,但并未提高伴矿景天对Cd的吸收,主要是因为供试土壤具有较高的缓冲性能。电场作用下,土壤中H⁺被大量消耗,导致H⁺迁移速率较慢;与此同时,阴极产生的大量OH⁻向阳极迁移造成阳极和阴极中间位置土壤pH升高。因此,除了施加硫粉的处理外,其他增强试剂处理条件下,施加电场反而使植物根区土壤pH有所升高,加之总Cd含量有所上升,最终使有效态Cd含量相对下降。另外,研究发现加入柠檬酸的处理中,土壤中Cd的迁移方向与其他处理不一致,主要是因为柠檬酸与Cd络合形成阴离子,导致Cd在电场中的迁移方向为从阴极向阳极迁移。

3.3 不同增强试剂和电场模式对伴矿景天生长和吸收Cd的影响

通过强化措施提高伴矿景天生物量或植物体内Cd浓度均有利于伴矿景天修复效率的提高。本研究中,在无电场条件下,施用DOM和柠檬酸均显著提高了伴矿景天地上部和地下部的生物量,这与大多数研究结果一致^[6-7]。伴矿景天生物量的提高显著增加了其对Cd的积累量,但是施加DOM和柠檬酸并未提高伴矿景天地上部和地下部Cd的浓度。这可能是生物量的提高对植物体内Cd浓度产生了稀释效应;也可能与DOM和柠檬酸的加入量及加入次数有关。本研究中DOM和柠檬酸分别在试验开始前一次性加入,因此其对土壤重金属的活化作用有限。另外,本研究发现施加硫粉促进了伴矿景天对Cd的吸收,且对根部Cd吸收的促进作用达到显著水平。但是由于施加硫粉显著降低了伴矿景天地上部的生物量,导致伴矿景天地上部对Cd的积累量显著降低。本研究中硫粉对伴矿景天生长的抑制作用可能与硫粉的施加量(2 g·kg⁻¹)过高有关。魏帅^[24]的研究表明,在稻季施加100 mg·kg⁻¹的硫单质能显著促进东南景天的生长及东南景天地上部对Cd的吸收。除了施加量以外,施加硫粉对伴矿景天生长的影响也与土壤类型密切相

关。WU等^[9]的研究表明,在两种不同类型土壤中,硫粉施用量 $\geq 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (石灰性紫色新成土,pH 8.0)和 $\geq 1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (黄泥土,pH 6.0)时,均显著降低了伴矿景天地上部干质量,但是施加 $0.5\sim 4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硫粉均显著提高了伴矿景天地上部Cd含量。

电动过程对植物生长和对重金属的吸收均会产生影响,进而影响植物对重金属的积累。本研究发现,施加固定直流电场显著抑制了伴矿景天生长,这可能与伴矿景天和电极之间距离较近或与电场强度较高有关。前人的研究成果也表明,电动过程中阳极和阴极附近产生的pH的剧烈变化会对植物生长产生负面影响。本研究中,交换电场相对固定直流电场增加了植物生物量,是因为交换电场方向会缓解直流电场对植物生长产生的不利影响^[27]。本研究中,与未加电场的处理相比,固定直流电场对伴矿景天根系吸收Cd具有一定的促进作用,这与本课题组之前的研究结果一致^[15]。仓龙等的研究也表明直流电场促进了黑麦草根的生长和对铜的吸收^[27]。但也有研究得出不同的结论,徐海舟^[28]通过优化电场条件发现在水平电场条件下,电压梯度为 $1\text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$,通电时间 $6\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,直流电场对东南景天生长具有促进作用,交换电场方向对东南景天生物量影响较小,而交换电场方向处理下东南景天Cd吸收量最高,不交换电场方向东南景天Cd吸收量有所降低。另外,本研究中无论是否施加电场,施加硫粉对伴矿景天生长的抑制作用仅局限于地上部。XIAO等^[12]的研究结果表明,在添加猪粪、腐植酸或EDTA的处理中,水平交换直流电场(每日改变电场方向)显著降低了东南景天地下部的生物量,但对地上部的生物量无显著影响。由此可见,二维电场中,伴矿景天对电场的响应不同于一维电场,不同的试验结果也与土壤性质、添加剂、植物种类密切相关^[29]。

总体而言,在未施加电场条件下,施加DOM和柠檬酸可显著促进伴矿景天生长,在利用伴矿景天修复Cd污染土壤时,可考虑施用DOM和柠檬酸进行辅助强化修复,进而提高伴矿景天对Cd的提取效率。施加硫粉可有效降低土壤pH,且固定直流电场与硫粉共同作用可显著增加伴矿景天根系Cd浓度,其对地上部的吸收也有促进作用,但是其较高的施用量显著抑制了伴矿景天生长,从而降低了伴矿景天对Cd的积累量。因此,在利用伴矿景天修复碱性污染土壤时,电场+硫粉处理可作为一种有效的强化措施,但是硫粉的施用量需要针对不同土壤类型进行优化。

另外,施加固定直流电场和反转电场均抑制了伴矿景天生长,且与施加不同增强试剂(DOM和柠檬酸)相比,电场对伴矿景天生长和对Cd吸收的影响起主导作用。因此,在今后的研究中,电极与植物之间的距离、电场强度以及通电时间还需要进一步优化。

4 结论

(1)无电场条件下,施加硫粉能有效降低土壤pH,但显著降低了伴矿景天地上部生物量。施加菌菇渣DOM和柠檬酸显著促进了伴矿景天生长,但对伴矿景天地上部和地下部Cd含量无显著影响。

(2)施加固定直流电场促进了土壤总Cd的迁移,同时提高了植物生长区域总Cd含量。而反转电场使各处理中Cd由表层向底层迁移。

(3)施加固定直流电场和反转电场均抑制了植物生长,固定直流电场相对反转电场可增加植物对Cd的吸收,反转电场相对固定直流电场能增加植物生物量。

(4)有无电场条件下,施加硫粉均显著促进了伴矿景天根部对Cd的积累。固定直流电场与硫粉共同作用时,伴矿景天地上部和地下部的Cd浓度高于其他处理,但硫粉的施加浓度需要进一步优化,以缓解对伴矿景天生长的抑制作用。

(5)电场与不同增强试剂共同作用对伴矿景天生长和吸收Cd的影响不同。电场与硫粉共同作用时,硫粉对伴矿景天生长和Cd吸收的影响起主要作用,电场与DOM和柠檬酸共同作用时,电场对伴矿景天生长和Cd吸收的影响占主导地位。

参考文献:

- [1] WU L H, LIU Y J, ZHOU S B, et al. *Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou ex L. H. Wu (Crassulaceae): A new species from Zhejiang Province, China[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2013, 299 (3): 487-498.
- [2] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3422-3426. LIU L, WU L H, LI N, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3422-3426.
- [3] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及镉吸收性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 221-225. SHEN L B, WU L H, HAN X R, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2): 221-225.
- [4] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation

- strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2017, 171:710–721.
- [5] VARGAS C, PEREZ-ESTEBAN J, ESCOLASTICO C, et al. Phytoremediation of Cu and Zn by vetiver grass in mine soils amended with humic acids[J]. *Environmental Science and Pollutant Research*, 2016, 23: 13521–13530.
- [6] 吴孟君, 张德馨, 胡宏祥, 等. 不同活化剂对伴矿景天富集镉的影响[J]. 惠州学院学报, 2020, 40(3):36–41. WU M J, ZHANG D X, HU H X, et al. The effect of different activators on cadmium accumulation in *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Huizhou University*, 2020, 40(3):36–41.
- [7] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12):2762–2770. DENG Y Q, CAO X Y, TAN C Y, et al. Effect of organic materials on phytoremediation efficiency of Cd-contaminated acid soil by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12):2762–2770.
- [8] KAYSER A, WENGER K, KELLER A, et al. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments[J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2000, 34: 1778–1783.
- [9] WU G M, HU P J, ZHOU J W, et al. Sulfur application combined with water management enhances phytoextraction rate and decreases rice cadmium uptake in a *Sedum plumbizincicola* – *Oryza sativa* rotation[J]. *Plant Soil*, 2019, 440:539–549.
- [10] HODKO D, HYFTE J V, DENVER A, et al. Methods for enhancing phytoextraction of contaminants from porous media using electrokinetic phenomena: US Patent No. 6, 145, 244[P]. 2000–11–14.
- [11] MAO X Y, HAN F X, SHAO X H, et al. Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 125:16–24.
- [12] XIAO W D, LI D, YE X Z, et al. Enhancement of Cd phytoextraction by hyperaccumulator *Sedum alfredii* using electrical field and organic amendments[J]. *Environmental Science and Pollutant Research*, 2017, 24(5):5060–5067.
- [13] PUTRA R S, OHKAWA Y, TANAKA S. Application of EAPR system on the removal of lead from sandy soil and uptake by Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 102:34–42.
- [14] LUO J, WU J, HUO S Y, et al. A real scale phytoremediation of multi-metal contaminated e-waste recycling site with *Eucalyptus globulus* assisted by electrical fields[J]. *Chemosphere*, 2018, 201:262–268.
- [15] FAN G P, ZHOU D M, ZHANG Z H, et al. Effect of two-dimensional electric field on the growth and cadmium uptake of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259:118121.
- [16] 廉梅花. 根际土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015:83–116. LIAN M H. Study on the activating factors and mechanisms of heavy metals in rhizosphere soil[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015:83–116.
- [17] 樊扬帆. 外源螯合剂柠檬酸和NTA对苧麻修复重金属Cd污染土壤的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015:27–40. FAN Y F. The effects of exogenous CA and NTA on phytoremediation of cadmium by *Boehmeria nivea* (L.) Gaud[D]. Changsha: Hunan University, 2015:27–40.
- [18] CAMESELLE C, CHIRAKKARA R A, REDDY K R. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities[J]. *Chemosphere*, 2013, 93:626–636.
- [19] CHIRAKKARA R A, REDDY K R, CAMESELLE C. Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed contaminated soil[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 181:179–191.
- [20] LUO J, XING X L, QI S H, et al. Comparing the risk of metal leaching in phytoremediation using *Nocca caerulea* with or without electric field[J]. *Chemosphere*, 2019, 216:661–668.
- [21] AZEEZ J O, ADELEYE O A, OYINLOLA R O. The effect of sulfur and urea on the heavy metal extraction by African wild sunflower (*Tithonia diversifolia*) in an artificially contaminated soil[J]. *Communications in Soil Sciences and Plant Analysis*, 2016, 47:1940–1949.
- [22] ZHAO K L, LIU X M, XU J M, et al. Heavy metal contaminations in a soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181:778–787.
- [23] GADD G M. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation[J]. *Geoderma*, 2004, 122:109–119.
- [24] 魏帅. 硫酸对水稻-东南景天轮作系统中镉有效性及根际细菌群落特征的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019:47–48. WEI S. Effect of sulfur on the bioavailability of cadmium and characteristics of rhizosphere bacterial community in rice-*Sedum alfredii* Hance rotation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019:47–48.
- [25] 张根柱, 张社奇, 邵丽, 等. 外源柠檬酸对黄土高原塬土土壤养分的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2):47–51. ZHANG G Z, ZHANG S Q, SHAO L, et al. Effects of exogenous citric on nutrients of old manured loessal soil[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(2):47–51.
- [26] LI Z, WU L H, HU P J, et al. Repeated phytoextraction of four metal-contaminated soils using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189:176–183.
- [27] 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. 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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4):729–735.
- [28] 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[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015:14–25. XU H Z. Efficiency of direct current (DC) field and *Sedum alfredii* Hance on remediation to cadmium contaminated soil[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015:14–25.
- [29] 魏树和, 徐雷, 韩冉, 等. 土壤重金属污染的电动-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. WEI S H, XU L, HAN R, et al. Review on combined electrokinetic and phytoremediation technology for soil contaminated by heavy metal[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(1):154–160.