

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

刘 波^{1,2}, 陈 绩^{1,2}, 马嘉伟^{1,2}, 方先芝^{1,2}, 赵科理^{1,2}, 柳 丹^{1,2}, 叶正钱^{1,2}

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

摘要: 【目的】研究交流电场和土壤水分对褪色柳 *Salix discolor*-东南景天 *Sedum alfredii* 混栽模式下镉污染土壤修复效率的影响。【方法】通过土壤盆栽试验, 研究不同水分 [湿润 (60% 土壤田间持水量)、高水分 (100% 土壤田间持水量)] 和不同交流电场 (0 和 $0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$) 的组合处理, 对土壤镉活性、褪色柳和东南景天生长及镉吸收与积累的影响。【结果】交流电场显著提高土壤有效态镉质量分数、促进褪色柳和东南景天地上部对镉的积累, 与对照相比, 有效态镉质量分数显著提高 16.13% ($P < 0.05$), 柳叶、东南景天地上部镉积累量分别提高 12.61%、22.50%; 高水分+电场处理有利于提高土壤 pH、碱解氮质量分数, 以及残渣态镉所占比例, 与对照相比分别提高 6.47%、12.09%、22.89% ($P < 0.05$), 但会影响褪色柳、东南景天积累重金属镉, 与对照相比, 柳叶、东南景天地上部镉积累量分别降低 95.60% ($P < 0.05$)、18.02%。【结论】土壤湿润条件下施加电场有利于褪色柳-东南景天修复镉污染土壤, 褪色柳和东南景天地上部镉总积累量分别是其他处理的 1.13~1.93 倍。表 4 参 40

关键词: 土壤水分; 交流电场; 褪色柳; 东南景天; 混栽; 土壤镉; 植物修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2021)06-1238-07

Effects of AC electric field and soil moisture on phytoremediation of cadmium contaminated soil by mixed planting of *Salix discolor* and *Sedum alfredii*

LIU Bo^{1,2}, CHEN Ji^{1,2}, MA Jiawei^{1,2}, FANG Xianzhi^{1,2}, ZHAO Keli^{1,2}, LIU Dan^{1,2}, YE Zhengqian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study is aimed to examine the effects of alternating current (AC) electric field and soil moisture on the remediation efficiency of cadmium (Cd) contaminated soil via the mixed planting of *Salix discolor* and *Sedum alfredii*. [Method] With a soil pot experiment, an investigation is conducted of the effects of 2 soil water treatments (moist, keeping 60% of the soil field capacity, and high water content, equivalent to paddy field condition, flooding) combined with 2 AC electric field gradients (0, $0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$) on soil Cd availability and plant growth of *S. discolor* and *S. alfredii*. [Result] The application of $0.5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ AC electric field significantly increased soil available Cd concentration [by 16.13% ($P < 0.05$)], and promoted the absorption and accumulation of Cd in *S. discolor* and *S. alfredii*, the soil available Cd and Cd accumulation in leaves of *S.*

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-04-30

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2018C03028)

作者简介: 刘波 (ORCID: 0000-0003-0206-8634), 从事资源利用与植物保护研究。E-mail: 1341248569@qq.com。通

信作者: 叶正钱 (ORCID: 0000-0002-6321-815X), 教授, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

discolor and the above-ground parts of *S. afredii* were significantly higher (by 12.61% and 22.50% respectively) than those of the control. The integrated application of high moisture and electric field contributed to the increase of soil pH, alkali-hydrolysable nitrogen concentration and the proportion of residual cadmium by 6.47%, 12.09% and 22.89% ($P < 0.05$) compared with those of the control. This integrated application reduced the accumulation of Cd in *S. discolor* and *S. afredii*, the accumulation of Cd in leaves of *S. discolor* and the above-ground parts of *S. afredii* were lower than that of the control by 95.60% ($P < 0.05$) and 18.02% respectively. [Conclusion] Under moist condition, the AC electric field was beneficial to the phytoremediation of Cd contaminated soil via the mixed planting of *S. discolor* and *S. afredii*. And the Cd accumulated in the above-ground parts of *S. discolor* and *S. afredii* was 1.13–1.93 times of that achieved with other treatments. [Ch, 4 tab. 40 ref.]

Key words: soil moisture; AC electric field; *Salix discolor*; *Sedum alfredii*; mixed planting; soil cadmium; phytoremediation

随着工矿业的发展, 矿业冶炼、工业废水及废弃物排放等含镉 (Cd) 污染物不断进入土壤, 土壤镉污染问题日益严重。镉不仅损害植物的生长发育, 影响植株的生理代谢, 还会在农作物中富集, 通过食物链进入人体, 威胁人体健康^[1], 进行镉污染土壤修复研究刻不容缓。土壤镉污染修复技术主要有物理修复、化学修复、生物修复以及多措施联合修复等。与传统的理化修复方法相比, 植物修复技术成本低、操作简易, 应用广泛^[2-3]。但植物材料易受环境等因素影响, 因此需要优化植物提取土壤重金属的条件^[4]。结合电动修复技术可以提高植物修复效率, 具有良好发展前景^[5]。研究证实交流电场可以促进黑麦草 *Lolium perenne*^[6]、莴苣 *Lactuca sativa*^[7]、东南景天 *Sedum alfredii*^[8] 等植物的生长, 加快植物对重金属的吸收积累。植物联合电动修复技术不仅能提高土壤中重金属的有效性, 还能促进植物生长和对重金属的富集^[9], 强化植物吸收修复效率, 提升植物修复技术的实际应用前景。水分是贯穿土壤-植物-大气系统的动力因素, 不仅直接影响植物的生长, 还会通过改变土壤 pH、氧化还原状况等影响土壤物质转化, 从而间接影响重金属在土壤固-液两相的分配, 影响土壤中重金属的有效性和植物对土壤重金属的吸收^[10]。ANGLE 等^[11]对遏蓝菜 *Thlaspi caerulescens*、崖雪球 *Alyssum murale* 等的研究表明: 随着土壤含水量的增加, 植物生物量和对重金属积累能力也随之增加。然而, 国内外在关于电场、水分对植物生长和金属吸收性方面研究报道很少。因此本研究以褪色柳 *Salix discolor*、东南景天为对象, 采用混栽盆栽试验, 研究电场和水分对褪色柳和东南景天生长和对土壤重金属镉吸收积累的影响, 为进一步优化提升植物修复土壤重金属镉提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤采自温州市农业科学研究院试验基地, 为重金属镉污染的耕地土壤。取 0~20 cm 表层土壤, 放于阴凉处风干, 过 2 mm 筛备用。供试土壤理化性质: 土壤 pH 6.30; 有机质 41.50 g·kg⁻¹; 碱解氮 242.00 mg·kg⁻¹; 有效磷 72.30 mg·kg⁻¹; 速效钾 354.00 mg·kg⁻¹; 有效态镉 0.28 mg·kg⁻¹; 全镉 2.47 mg·kg⁻¹。

供试柳树由江苏宿迁名世园艺提供。将长势良好且相近的褪色柳枝条剪成 15 cm 长的插条, 超纯水洗净备用。东南景天取自浙江省衢州市一古老铅锌矿, 栽培于浙江农林大学平山试验基地, 选用大小相近东南景天苗植株作为供试材料。

1.2 设计

将 4 kg 风干土搅拌均匀后装盆 (上直径 202 mm, 高 198 mm, 下直径 170 mm), 褪色柳枝条和东南景天幼苗各 5 株移栽入盆, 随机排列。设置 2 种电场强度和 2 种土壤水分, 共 4 个处理: 以不通电、湿润 (土壤田间持水量保持为 60%) 处理为对照 (ck), 通电、湿润处理为 E 组, 不通电、高水分 (土壤田间持水量为 100%) 处理为 W 组, 通电、高水分处理为 EW 组。试验前调节各处理土壤含水量, 在 E 组和 EW 组中每盆插入 2 根石墨棒, 设定电场强度为 0.5 V·cm⁻¹^[12-14]。各处理重复 3 次。2019 年 5 月开始试

验,隔1周调整1次电压,每日称量加水以保持土壤水分;2019年12月收获植物样品,采集土样。

1.3 样品处理与测定

土壤 pH 采用 pH 计电位法测定,水土体积质量比为 2.5:1.0;碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法和醋酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[15]。土壤镉全量采用三酸[三酸分别为硝酸(HNO₃)、高氯酸(HClO₄)、氢氟酸(HF),体积比为 5:1:1]进行消煮,土壤有效镉采用二乙基三胺五乙酸(DTPA)试剂提取,镉形态分级参照欧洲共同体参考物机构(European Communities Bureau of Reference)改进的三步提取法(BCR)^[16],消煮液和提取液最后用石墨炉原子吸收仪(岛津 AA-7000)测定。

将所采植物样品分为柳叶、柳枝、东南景天地上部 3 个部分,用自来水和去离子水各清洗 1 次,105℃杀青 15 min,80℃下烘干至恒量,磨细过 20 目筛,供分析测定。植物样品经硫酸-过氧化氢消煮后,用石墨炉原子吸收仪(岛津 AA-7000)测定镉质量分数。采用便携式光合作用仪(Li-6400XT)于 9:00–11:00 在 25℃下测定褪色柳光合参数^[17],分别为净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、细胞间隙二氧化碳摩尔分数(C_i)。

1.4 数据处理

利用 SPSS 21 软件进行统计分析数据。计算植物镉积累量($\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$): $A_{\text{Cd}}=w_{\text{Cd}}\times B$,其中 w_{Cd} 为植物 Cd 质量分数($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B 为植物生物量($\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤的理化性质

由表 1 可知:与对照(ck)相比,高水分+电场处理(EW)下土壤 pH 显著升高($P<0.05$),电场(E)或高水分(W)单独处理对土壤 pH 无显著影响。W 和 EW 处理下土壤碱解氮质量分数显著提高 11.00%、12.09%($P<0.05$),E 处理下无显著变化。不同处理下土壤有机质、有效磷质量分数均无显著影响。

表 1 不同处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on basic soil chemical properties

处理	pH	有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
ck	6.18±0.13 b	38.71±2.12 a	192.97±8.17 b	72.85±3.40 a	465.00±13.08 ab
E	6.25±0.19 ab	42.75±1.05 a	190.63±12.01 b	72.95±6.95 a	483.30±16.26 a
W	6.46±0.18 ab	43.30±4.08 a	214.20±12.14 a	76.58±3.93 a	450.67±16.26 b
EW	6.58±0.17 a	43.39±2.13 a	216.30±11.57 a	76.71±5.93 a	469.67±12.58 ab

说明:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同处理对土壤镉有效性及镉形态转化的影响

与 ck 相比,E 处理下土壤有效态镉质量分数显著提高了 16.13%($P<0.05$),其他处理无显著变化。利用 BCR 法得到土壤不同形态镉比例,由表 2 可知:W 和 EW 处理下,土壤酸可提取态镉和可还原态镉比例分别显著降低了 2.78%、6.16% 和 2.72%、8.44%($P<0.05$),土壤残渣态镉比例则显著提高($P<0.05$)。W 处理下,土壤可氧化态镉比例显著提高($P<0.05$),E 处理对土壤所有镉形态均无显著影响($P>0.05$)。

表 2 不同处理对土壤有效态镉质量分数和镉形态的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil available Cd and its fractionations

处理	有效镉/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	酸可提取态/%	可还原态/%	可氧化态/%	残渣态/%
ck	0.31±0.02 b	14.23±1.37 a	37.45±2.29 a	2.53±0.49 b	45.79±2.19 b
E	0.36±0.04 a	14.59±1.17 a	38.90±2.04 a	3.13±0.66 ab	43.38±2.63 b
W	0.31±0.03 b	11.45±0.76 b	31.29±2.13 b	3.70±0.48 a	53.56±1.51 a
EW	0.35±0.01 ab	11.51±0.62 b	29.01±2.42 b	3.22±0.27 ab	56.27±1.90 a

说明:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.3 不同处理对褪色柳和东南景天生长的影响

由表 3 可知：与 ck 相比，W 处理后，柳叶、柳枝生物量分别提高 15.61% 和 27.11% ($P < 0.05$)，东南景天生物量显著降低 60.24% ($P < 0.05$)；EW 处理后，柳叶、柳枝生物量分别提高 34.39% 和 101.10% ($P < 0.05$)，东南景天显著降低 22.02% ($P < 0.05$)；E 处理对柳叶、柳枝及东南景天生物量均未产生显著影响。不同处理对褪色柳各项光合参数均未造成显著影响。综合来看，EW 处理促进褪色柳生长的效果最佳，其柳叶、柳枝生物量分别是 W 处理的 1.16 和 1.58 倍，是 E 处理的 1.25 和 2.08 倍。

表 3 不同处理对植物生物量以及褪色柳光合参数的影响

Table 3 Effects of different treatments on plant biomass and photosynthesis of *S. discolor*

处理	柳叶干质量/ (g·盆 ⁻¹)	柳枝干质量/ (g·盆 ⁻¹)	东南景天地上部 干质量/(g·盆 ⁻¹)	T_r / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	P_n / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	C_i / (μmol·mol ⁻¹)	G_s / (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)
ck	5.70±1.21 a	2.73±0.47 c	1.33±0.26 ab	5.24±0.43 a	11.64±2.12 ab	312.11±19.30 ab	0.28±0.03 a
E	6.13±0.71 a	2.64±0.25 c	1.49±0.28 a	4.98±2.33 a	13.96±5.86 a	301.03±11.12 b	0.29±0.13 a
W	6.59±0.44 a	3.47±0.23 b	0.83±0.11 c	4.94±1.94 a	6.45±0.85 b	341.40±16.36 a	0.27±0.12 a
EW	7.66±1.60 a	5.49±0.39 a	1.09±0.10 bc	5.60±1.59 a	7.83±0.73 ab	340.52±15.43 a	0.32±0.11 a

说明：同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 不同处理对褪色柳和东南景天镉吸收积累的影响

由表 4 可知：与 ck 相比，W 和 EW 处理的柳叶镉质量分数分别显著降低 106.91%、156.13% ($P < 0.05$)，柳枝镉质量分数分别显著降低 113.13%、165.80% ($P < 0.05$)；柳叶镉积累量分别显著降低 82.81%、95.60% ($P < 0.05$)，东南景天地上部镉积累量分别降低 63.15% 和 18.02%。而 E 处理中柳叶、东南景天地上部镉质量分数与对照相比分别提高 6.68%、9.59%；柳叶、东南景天地上部镉积累量与 ck 相比分别提高 12.61%、22.50%。各处理褪色柳和东南景天地上部镉总积累量由高到低依次为：E、ck、EW、W。

表 4 不同处理对植物镉吸收积累的影响

Table 4 Effects of different treatments on Cd absorption and accumulation in *S. discolor* and *S. alfredii*

处理	镉质量分数/(mg·kg ⁻¹)			植物镉积累量/(μg·盆 ⁻¹)			
	柳叶	柳枝	东南景天地上部	柳叶	柳枝	东南景天地上部	总地上部
ck	6.89±1.04 a	9.25±1.31 a	36.19±2.02 ab	39.98±13.30 a	25.69±8.00 a	48.00±7.63 ab	113.68±15.48 a
E	7.35±0.30 a	9.36±1.87 a	39.66±2.32 a	45.02±4.70 a	24.54±3.88 a	58.80±8.80 a	128.36±7.06 a
W	3.33±0.65 b	4.34±1.07 b	35.27±1.36 b	21.87±4.03 b	15.20±4.64 a	29.42±4.59 c	66.49±6.32 b
EW	2.69±0.49 b	3.48±0.59 b	37.49±1.69 ab	20.44±4.64 b	19.20±4.39 a	40.67±2.00 bc	80.31±4.99 b

说明：同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 水分和交流电场对土壤理化性质的影响

土壤速效养分是土壤肥力的重要指标，一定程度上反映了近期土壤对植物养分的供应情况^[18]。土壤碱解氮主要来源于有机氮的矿化分解，属于有效氮，是土壤中能够被植物直接吸收利用的氮素^[19-20]。本研究发现：施加电场对土壤理化性质无显著影响；高水分+电场处理显著提高碱解氮质量分数，但对有效磷、速效钾无显著影响。研究^[21-22]发现：长期高水分处理会使植株叶片叶绿素发生降解，导致叶片衰老凋落，可能是土壤碱解氮质量分数升高的原因。同时，长时间的高水分处理会使土壤二氧化碳排放受阻，反应产生碳酸盐，提高土壤 pH^[23-24]。

3.2 水分和交流电场对土壤镉有效性及其形态的影响

重金属的生物活性不仅与其总量有关，更大程度上由其存在形态决定。重金属的不同形态会产生不同的环境效应，直接影响其迁移和在自然界的循环^[25-26]。本研究发现：施加电场显著提高了土壤有效镉质量分数，土壤金属离子活性的提高，有利于残渣态镉向交换态镉转化^[6, 27]。同时发现：高水分处理

下, 酸可提取态镉、可还原态镉比例显著降低, 残渣态镉比例显著提高, 这与 LI 等^[28]的研究结果一致。推测原因在于长期高水分处理下, 土壤氧化还原电位 (Eh) 降低, 土壤还原状况加强, 土壤中还原态阳离子 (如铁、锰离子) 和阴离子 (如硫离子) 相对含量增加, 硫离子与镉形成难溶的硫化物沉淀的机率提高^[29-30]。水分还会影响铁离子的氧化还原过程^[31], 长期高水分处理促进氧化铁还原, 形成新的镉氧化物。因此, 土壤高水分处理降低了土壤镉的有效性。

3.3 水分和交流电场对褪色柳和东南景天生长的影响

水分是影响植物生长发育的重要因素^[32]。本研究表明: 高水分处理后东南景天生物量的降低可能是由于土壤水分含量高导致根际缺氧, 从而抑制了其正常生长^[33]。而褪色柳喜湿耐涝, 具有较强的耐水性, 为耐水湿类树种^[34], 在高水分处理中表现为更有利于其生长。电场+高水分加快了褪色柳细胞分裂、分化, 促进褪色柳对营养元素的吸收, 从而使褪色柳地上部的生物量提高^[35-36]。

3.4 水分和交流电场对褪色柳和东南景天镉吸收、积累的影响

褪色柳生长迅速, 东南景天吸收重金属的能力强, 作为重要的镉富集和超积累植物, 褪色柳-东南景天混栽有利于单位面积土壤上植物对土壤中镉的高效吸收^[37]。在评价植物对镉污染土壤修复效率时, 主要考虑地上部镉积累量^[8]。研究发现: 湿润条件下施加电场, 有利于褪色柳和东南景天生长; 同时提高了土壤有效镉质量分数, 促进植物根系对镉的吸收^[38], 有利于褪色柳、东南景天对其的积累^[39]。高水分处理下, 土壤 pH 升高, 土壤溶液中多价阳离子和氢氧根离子 (OH^-) 增多, 加大了氢氧化镉沉淀生成的机率, 使土壤镉的有效性降低^[40]; 与此同时, 高水分下东南景天生物量也降低, 褪色柳和东南景天对土壤中镉的积累受到抑制。

因此, 土壤湿润条件比淹水处理更有利于褪色柳-东南景天混栽对土壤中重金属镉的吸收和积累。受时间限制, 本研究仅在褪色柳苗期进行, 就积累镉质量分数的顺序来看, 东南景天地上部要好于柳叶和柳枝。

4 结论

交流电场的施加可提高土壤有效镉质量分数, 促进褪色柳-东南景天地上部对镉的积累, 对土壤理化性质及土壤中镉形态分布无显著影响。高水分处理提高了土壤碱解氮质量分数以及可氧化态镉和残渣态镉比例, 但会抑制东南景天生长, 降低褪色柳、东南景天对镉的积累。因此, 适宜水分条件下, 施加电场有利于褪色柳-东南景天混栽对土壤中重金属镉的吸收和积累。

5 参考文献

- [1] MORIARTY F. *Ecotoxicology: The Study of Pollutants in Ecosystems* [M]. London: Academic Press, 1999: 29 – 35.
- [2] RASCIO N, NAVARI-IZZO F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. *Plant Sci*, 2011, **180**(2): 169 – 181.
- [3] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 徐剑锋, 王雷, 熊琰, 等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2017, **7**(3): 366 – 373.
XU Jianfeng, WANG Lei, XIONG Ying, *et al.* Research progress on strengthening phytoremediation technologies for heavy metals contaminated soil [J]. *J Environ Eng Technol*, 2017, **7**(3): 366 – 373.
- [5] 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.
LIU Yue, NIU Tingyu, LI Tianguo, *et al.* Characteristics and opportunities of electrokinetic-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. *Chem Ind Eng Prog*, 2020, **39**(12): 5252 – 5265.
- [6] 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 Long, ZHOU Dongmei, WU Danya. Effects of horizontal exchange electric field and EDDS application on ryegrass uptake of copper/zinc and soil characteristics [J]. *Acta Pedol Sin*, 2009, **46**(4): 729 – 735.
- [7] BI Ran, 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]. *J Appl Electrochem*, 2010, **40**: 1217 – 1223.
- [8] 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.

- XIAO Wendan, YE Xuezhu, XU Haizhou, *et al.* Intensification of phytoremediation of Cd contaminated soil with direct current field and soil amendments in addition to hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Acta Pedol Sin*, 2017, **54**(4): 927 – 937.
- [9] CAMESELLE C, CHIRAKKARA R A, REDDY K R. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: status and opportunities [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(4): 626 – 636.
- [10] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有效性的影响[J]. *土壤*, 2014, **46**(6): 1045 – 1051.
DENG Lin, LI Zhu, WU Longhua, *et al.* Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability [J]. *Soils*, 2014, **46**(6): 1045 – 1051.
- [11] ANGLE J S, BAKER A J M, WHITING S N, *et al.* Soil moisture effects on uptake of metals by *Thlaspi*, *Alyssum*, and *Berkheya* [J]. *Plant Soil*, 2003, **256**(2): 325 – 332.
- [12] 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.
YAO Guihua. *Effects of Alternating Current (AC) Field and Organic Materials on Improving the Efficiency of Sedum alfredii Hance to Remediate Heavy Metal Contaminated Soil*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015.
- [13] 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]. *Chin J Environ Eng*, 2019, **13**(11): 2682 – 2690.
- [14] 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.
NI Xing, LI Yaqian, WANG Shengnan, *et al.* Alternating current electric field promotes willow plant to remediate cadmium contaminated soil [J]. *Environ Chem*, 2019, **38**(10): 2376 – 2385.
- [15] 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.
- [16] TOKALIOĞLU Ş, KARTAL Ş, GÜLTEKİN A. Investigation of heavy-metal uptake by vegetables growing in contaminated soils using the modified BCR sequential extraction method [J]. *Int J Environ Anal Chem*, 2006, **86**(6): 417 – 430.
- [17] 陈芳清, 黄友珍, 樊大勇, 等. 水淹对狗牙根营养繁殖植株的生理生态学效应[J]. *广西植物*, 2010, **30**(4): 488 – 492.
CHEN Fangqing, HUANG Youzhen, FAN Dayong, *et al.* Ecophysiological responses of vegetative propagule of *Cynodon dactylon* to simulated summer flooding [J]. *Guihaia*, 2010, **30**(4): 488 – 492.
- [18] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(7): 1236 – 1244.
CHANG Chao, XIE Zongqiang, XIONG Gaoming, *et al.* The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir [J]. *J Nat Resour*, 2011, **26**(7): 1236 – 1244.
- [19] 杨予静, 李昌晓, 张晔, 等. 水淹-干旱交替胁迫对湿地松幼苗盆栽土壤营养元素含量的影响[J]. *林业科学*, 2013, **49**(2): 61 – 71.
YANG Yujing, LI Changxiao, ZHANG Ye, *et al.* Effects of submergence and drought alternation on nutrient contents in the soil growing slash pine (*Pinus elliottii*) seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(2): 61 – 71.
- [20] 万福绪, 杨东. 苏北海堤杉木杨树混交林林木生长及土壤肥力研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006, **30**(2): 43 – 46.
WAN Fuxu, YANG Dong. Studies on trees growth and soil fertility characters of mixed stand of Chinese fir and poplar [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2006, **30**(2): 43 – 46.
- [21] ASHRAF M, ARFAN M. Gas exchange characteristics and water relations in two cultivars of *Hibiscus esculentus* under waterlogging [J]. *Biol Plant*, 2005, **49**(3): 459 – 462.
- [22] ANELLA L B, WHITLOW T H. Photosynthetic response to flooding of *Acer rubrum* seedlings from wet and dry sites [J]. *Am Midl Nat*, 2000, **143**(2): 330 – 341.
- [23] PAN Yunyu, BONTEN L T C, KOOPMANS G F, *et al.* Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage [J]. *Geoderma*, 2016, **261**: 59 – 69.
- [24] HINDERSMANN I, MANSFELDT T. Trace element solubility in a multimetal-contaminated soil as affected by redox conditions [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2014, **225**(10): 2518. doi: 10.1007/s11270-014-2158-8.
- [25] 钱进, 王子健, 单孝全. 土壤中微量金属元素的植物可给性研究进展[J]. *环境科学*, 1995, **16**(6): 73 – 75.

- QIAN Jin, WANG Zijian, SHAN Xiaoquan. Progress in the investigation on plant availability of soil trace metals [J]. *Environ Sci*, 1995, **16**(6): 73 – 75.
- [26] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1499 – 1502.
HAN Chunmei, WANG Linshan, GONG Zongqiang, *et al.* Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24**(12): 1499 – 1502.
- [27] 罗启仕, 张锡辉, 王慧, 等. 非均匀电动力学修复技术对土壤性质的影响[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(4): 40 – 45.
LUO Qishi, ZHANG Xihui, WANG Hui, *et al.* Influence of non-uniform electrokinetic remediation technology on soil properties [J]. *Techniq Equip Environ Pollut Control*, 2004, **5**(4): 40 – 45.
- [28] LI Jianrui, XU Yingming. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment [J]. *Chemosphere*, 2015, **122**: 131 – 136.
- [29] 郑顺安, 郑向群, 张铁亮, 等. 水分条件对紫色土中铅形态转化的影响[J]. *环境化学*, 2011, **30**(12): 2080 – 2085.
ZHENG Shun'an, ZHENG Xiangqun, ZHANG Tieliang, *et al.* Effect of moisture regime on the fractionation of lead in purple soil [J]. *Environ Chem*, 2011, **30**(12): 2080 – 2085.
- [30] HU Pengjie, HUANG Jiexue, OUYANG Younan, *et al.* Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars [J]. *Environ Geochem Health*, 2013, **35**(6): 767 – 778.
- [31] BARTLETT R, JAMES B. Studying dried, stored soil samples: some pitfalls [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, **44**(4): 721 – 724.
- [32] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. *土壤*, 2009, **41**(4): 572 – 576.
CUI Liqiang, WU Longhua, LI Na, *et al.* Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola* [J]. *Soils*, 2009, **41**(4): 572 – 576.
- [33] 张洁. 景天属植物对水涝胁迫的响应机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
ZHANG Jie. *Response Mechanisms of Sedum spp. to Waterlogging Stress* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [34] 刘俊龙, 吴中能, 欧阳海言, 等. 竹柳持续淹水后的生长状况及耐水性调查研究[J]. *安徽林业科技*, 2012, **38**(1): 20 – 22.
LIU Junlong, WU Zhongneng, OUYANG Haiyan, *et al.* Research on the growth and flooding tolerance of American bamboo willow after prolonged flooding [J]. *Anhui For Sci Technol*, 2012, **38**(1): 20 – 22.
- [35] 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.
NIE Bin. *The Study of Influence of Direct Current Electrical Fields on Phytoremediation of Cd* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [36] 温尚斌, 马福荣, 许守民, 等. 高压静电场促进植物吸收离子机理的初步探讨[J]. *生物化学与生物物理进展*, 1995, **22**(4): 377 – 379.
WEN Shangbin, MA Furong, XU Shoumin, *et al.* The mechanism of ion absorption stimulated by the high voltage electrostatic field [J]. *Prog Biochem Biophys*, 1995, **22**(4): 377 – 379.
- [37] 倪幸. 不同强化措施对提高柳树修复镉污染土壤效率的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
NI Xing. *Effect of Different Strengthening Measures on Improving Efficiency of Willow to Remediate Cadmium Contaminated Soil* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [38] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(5): 1863 – 1868.
HE Junyu, WANG Yangyang, REN Yanfang, *et al.* Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18**(5): 1863 – 1868.
- [39] 胡宏韬, 程金平. 土壤铜镉污染的电动力学修复实验[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 511 – 514.
HU Hongtao, CHENG Jinping. Experimental study on electrokinetic remediation of copper and cadmium contaminated soils [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18**(2): 511 – 514.
- [40] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. *云南农业大学学报*, 2005, **20**(4): 539 – 543.
DU Caiyan, ZU Yanqun, LI Yuan. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil [J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2005, **20**(4): 539 – 543.