

植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力

曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 程学宇, 刘路路, 张学文, 黄硕霈

引用本文:

曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 程学宇, 刘路路, 张学文, 黄硕霈. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 765–773.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0990>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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
农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2669–2680 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0398>

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

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>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 等. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 765–773.

CAO X Y, TAN C Y, CAI R Z, et al. Potential of plant rotation patterns for phytoremediation of cadmium contaminated farmland[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(4): 765–773.



开放科学 OSID

植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力

曹雪莹¹, 谭长银^{2*}, 蔡润众², 程学宇², 刘路路², 张学文¹, 黄硕霈²

(1. 长沙学院乡村振兴研究院, 长沙 410022; 2. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081)

摘要:为探讨不同植物镉(Cd)的积累特征及对Cd污染土壤的修复潜力,筛选便于推广的中轻度Cd污染农田土壤的植物修复模式,通过田间试验,利用不同吸Cd特性的水稻、油菜、油葵和伴矿景天等植物进行组合轮作,对土壤Cd有效性、植物不同部位Cd含量、富集系数、Cd积累量及移除量进行研究。结果表明:供试植物对土壤Cd的积累能力较强,除伴矿景天外,植物不同部位Cd的富集系数为1.03~8.82,不同轮作模式两茬植物地上部Cd积累量分别为13.81~81.34 g·hm⁻²和21.54~74.12 g·hm⁻²。不同轮作模式Cd移除量表现为伴矿景天与Cd高积累品种晚稻轮作(SPOS)>伴矿景天与Cd高积累油葵轮作(SPHA)>当地主栽品种早稻与Cd高积累品种晚稻轮作(CKOS)>当地主栽品种早稻与当地主栽品种晚稻轮作(CK)>Cd高积累品种油菜与Cd高积累品种晚稻轮作(HNOS),其中最大移除量达150.34 g·hm⁻²。第一茬植物收获后,伴矿景天降低土壤Cd含量和有效态Cd含量的效果最好,最高分别下降了15.66%和37.14%,而第二茬植物收获后,土壤有效态Cd含量均升高了95.51%以上,有利于下一年植物的吸取修复。油菜地上部Cd积累量最低,但其土壤有效态Cd含量较试验前升高了20.00%,且油菜生长期与伴矿景天接近,因此适宜与伴矿景天间套作。综上所述,伴矿景天与高积累晚稻轮作、伴矿景天与高积累油菜间套作对中轻度Cd污染农田修复潜力较大,可作为湘中Cd污染农田修复治理的种植模式。

关键词: 镉; 伴矿景天; 积累; 轮作; 修复潜力

中图分类号: S344.1; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)04-0765-09 doi:10.11654/jaes.2021-0990

Potential of plant rotation patterns for phytoremediation of cadmium contaminated farmland

CAO Xueying¹, TAN Changyin^{2*}, CAI Runzhong², CHENG Xueyu², LIU Lulu², ZHANG Xuewen¹, HUANG Shupei²

(1. Rural Vitalization Research Institute, Changsha University, Changsha 410022, China; 2. School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The accumulation of Cd in different plants and the potential of plants for phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil were examined to screen for suitable phytoremediation models for moderate and mild Cd-contaminated farmland soil. We examined rice, oilseed rape, oil sunflower, and *Sedum plumbizincicola* with different Cd absorption characteristics for combined crop rotation by studying variations in the soil Cd availability, Cd content in different plant parts, enrichment factor, Cd accumulation, and Cd removal owing to the plant rotation pattern. The enrichment factor of Cd in different plant parts, except in *S. plumbizincicola*, and accumulation of Cd aboveground were 13.81~81.34 g·hm⁻² and 21.54~74.12 g·hm⁻² for different plant rotation patterns, respectively. Cd removal owing to different plant rotation patterns was in the order of SPOS (rotation of *S. plumbizincicola* and Cd high accumulation variety of late rice) > SPHA (rotation of *S. plumbizincicola* and Cd high accumulation variety of oil sunflower) > CKOS (rotation of local main cultivar of early rice

收稿日期: 2021-08-30 录用日期: 2021-11-05

作者简介: 曹雪莹(1988—), 女, 湖南宜章人, 博士, 讲师, 主要从事土壤环境与农产品安全研究。E-mail: xycao2016@163.com

*通信作者: 谭长银 E-mail: chytan@hunnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42107018); 湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2021JJ40630); 湖南省科技厅创新性省份建设专项经费资助项目(2020NK2001); 长沙市自然科学基金项目(kq2007082)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(42107018); The Young Scientists Fund of Natural Science Foundation of Hunan Province(2021JJ40630); Hunan Innovative Province Construction Special Fund(2020NK2001); The Natural Science Foundation of Changsha, China(kq2007082)

and Cd high accumulation variety of late rice)>CK(rotation of local main cultivar of early rice and local main cultivar of late rice)>HNOS(rotation of Cd high accumulation variety of oilseed rape and Cd high accumulation variety of late rice), and the maximum amount of Cd removed was $150.34 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$. After harvest of the first crop, the Cd content and available Cd content of the soil decreased by 15.66% and 37.14%, respectively, for *S. plumbizincicola*. However, after the second crop was harvested, the available Cd content in the soil increased by more than 95.51%, which was conducive for the absorption and phytoremediation in the next year. Among all treatments, the amount of Cd accumulated aboveground was the lowest in oilseed rape, but the available Cd content was increased by 20.00% compared with that before the experiment; the growth period of oilseed rape was similar to that of *S. plumbizincicola*. In conclusion, the rotation of *S. plumbizincicola* and Cd high accumulation variety of late rice and Cd high accumulation variety of oilseed rape intercropping with *S. plumbizincicola* show potential for phytoremediation of moderate and mild Cd-contaminated farmland soil and can be used as planting modes for phytoremediation of Cd-contaminated farmland in central Hunan.

Keywords: cadmium; *Sedum plumbizincicola*; accumulation; plant rotation; phytoremediation potential

农田土壤镉(Cd)污染对食品安全、人群健康及生态环境可持续发展构成了严重威胁,开发可复制、可大面积推广的Cd污染土壤修复技术意义重大。土壤Cd污染的修复方法主要有物理修复、化学修复和生物修复等,这些修复技术均有不同程度的局限性,如:物理修复能耗大、成本高,无法进行大面积推广;化学修复易造成土壤二次污染;生物修复技术周期较长等。在中轻度重金属污染耕地修复实践中,一些生长周期短、生物量大且适应性强的农作物在修复Cd污染土壤方面具有较大的应用潜力^[1-2]。研究发现,Cd高积累油菜成熟期生物量可达 $7.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,地上部Cd积累量达 $3.60 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3]。焦玉宇等^[4]通过田间试验比较发现,油菜地上部Cd含量最高可达 $19.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,生物富集系数最高达8.67,地上部Cd积累量最大为 $114 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同品种水稻对Cd的吸收积累存在较大差异,当土壤Cd含量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻秸秆Cd含量最高可达 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且水稻还能正常生长^[5]。部分研究已采用Cd高积累品种水稻进行Cd污染农田修复,水稻成熟期收获时的Cd积累量达到 $657 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,连续修复两年后土壤Cd含量降低18%,修复能力优于Cd超积累植物^[6-7]。

植物修复田间实践表明,因化学调控、农艺措施等可以进一步提高植物地上部生物量和Cd的积累量,而在农田土壤Cd污染修复中受到广泛关注^[8-9]。轮作是农业生产中常用的农艺措施之一,轮作植物不仅对耕地土壤理化性质影响差异较大,且轮作中多种植物的根系分泌物有利于增强土壤微生物的活性和多样性,平衡氮(N)、磷(P)和钾(K)营养元素的比例,增加作物产量^[10-11]。王淑彬等^[12]研究发现,轮作可以改善土壤的通气性,从而促进土壤中硝化细菌、氨化细菌和自生固氮菌等多种有益功能性微生物数量的

增加。HUANG等^[13]的田间试验研究表明,稻菜轮作(油菜-水稻轮作)改善了土壤微生物群落组成,细菌和放线菌数量明显增多,真菌数量减少。此外,研究发现油菜-玉米-油菜轮作较油菜单作的生物量和Cd含量均明显提高^[14]。对于中轻度Cd污染农田土壤,不同植物的轮作修复技术有利于在实现Cd污染土壤修复的条件下保障农田土壤安全利用。

本研究在田间条件下,采用Cd高积累品种水稻、油菜、油菜和超积累植物伴矿景天等组合轮作,比较不同植物轮作模式对酸性Cd污染农田土壤的修复效果,通过土壤pH及Cd有效性的变化和植物Cd含量、Cd积累量及Cd移除量的比较,筛选出南方中轻度Cd污染农田土壤植物修复潜力较大的植物轮作模式,为Cd污染耕地的农业安全利用和种植模式选择提供有利的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省湘潭县易俗河镇飞龙桥村($27^{\circ}44'5.8''\text{N}$, $112^{\circ}56'26.7''\text{E}$),该地属山地丘陵区,成土母质为第四纪红色黏土,土壤类型为水耕人为土。该地区主要种植水稻,一年两熟。湘潭市属中亚热带季风湿润气候区,光热资源充足,年平均日照时数1 640~1 700 h,平均气温 $16.7\sim 17.4^{\circ}\text{C}$,降水资源充沛,全年降水量为1 200~1 500 mm,是我国重要的粮食产区。土壤呈弱酸性(pH 4.65),土壤有机质含量较低($24.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),全氮、全磷和全钾含量分别为 1.73 、 $0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷和速效钾含量分别为 $48.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $142.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤主要污染物为Cd,其含量达 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,《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Cd的风险筛选值为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,研究区土壤Cd含量超出风险筛选值1.77倍。DTPA提取态Cd含量为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效性较高。

1.2 供试植物

供试水稻(*Oryza sativa* L.)为当地主栽品种黑占43(从当地市场购买)和筛选的Cd高积累品种陵两优229(袁隆平农业高科技股份有限公司提供)。油菜(*Brassica napus* L.)为筛选的Cd高积累品种P103(湖南省农业科学院作物所提供)。油葵(*Helianthus annuus* Linn.)为筛选的Cd高积累品种S606高秆型(湖南省农业科学院作物所提供)。伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)扦插苗采自云南某重金属修复基地。

1.3 试验设计

试验共设5个处理,每个小区面积约 67 m^2 ,种植水稻的小区之间设立宽20 cm、高20 cm的田埂,旱作(伴矿景天、油菜和油葵)小区起垄高约20 cm,小区间隔约20 cm,试验设计见表1。2017年11月6日进行伴矿景天移栽和油菜播种,2018年4月4日早稻播种,油菜于5月6日收获,早稻和伴矿景天于7月6日收获;晚稻于7月26日播种,油葵于8月3日播种,11月3日同时收获晚稻和油葵,每次收获植物的同时采集土壤表层样品。在无植物生长季节,农田保持不耕不种。所有处理施用相同基肥(复合肥 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N、P和K总含量为48%,N:P:K=16:16:16),水稻追肥量是基肥量的2倍(分两次),旱作植物追肥与基肥相同,水分管理依据当地农业管理进行。所有植物收获后地上部均离田。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	轮作模式 Rotation pattern
CK	当地主栽品种早稻-当地主栽品种晚稻
CKOS	当地主栽品种早稻-Cd高积累品种晚稻
SPOS	伴矿景天-Cd高积累品种晚稻
HNOS	Cd高积累品种油菜-Cd高积累品种晚稻
SPHA	伴矿景天-Cd高积累油葵

1.4 样品采集与处理

植物成熟时采集表层(0~15 cm)土壤样品和植物混合样品,在各小区分别设置3个采样区,每个采样区按S形布设5个采样点,土壤采样点的位置为植物根际的位置,土壤与植物样品一一对应,将每个采样区的土壤和植物样品分别混合均匀并标记。土壤样品风干去除植物残体后用四分法取1.0 kg左右,然后分别过2.0 mm和0.15 mm尼龙筛,装袋备用。植物样

品分为地下部和地上部,其中水稻地上部再分为糙米、谷壳和秸秆,油菜地上部分为籽、壳和秸秆,油葵地上部分为花、叶和秆。为确保植物样品的完整性和整洁性,样品量较大的部分先用不锈钢剪刀剪成3 cm左右长度,混合均匀后取0.5~1.0 kg,再用自来水与去离子水清洗,105 ℃杀青30 min,然后80 ℃烘干至质量恒定,粉碎后装袋备用。

土壤pH以土水比为1:2.5(m:V)的比例提取,用pHs-3C雷磁酸度计测定。土壤有效态Cd含量的测定采用DTPA浸提法,土壤和植物样品Cd含量的测定参考美国环保署的标准方法(US EPA3051a),放入微波消解仪(CEM MAR S6)对样品进行消解,消解液和DTPA浸提液中Cd浓度的测定均采用原子吸收光谱仪(PinAAcle 900T)。在分析样品时加入10%~15%的重复数,分析过程中分别加入国家标准土壤样品(GSS-4)和植物样品(GSV-1)进行质量控制。

1.5 数据处理与分析

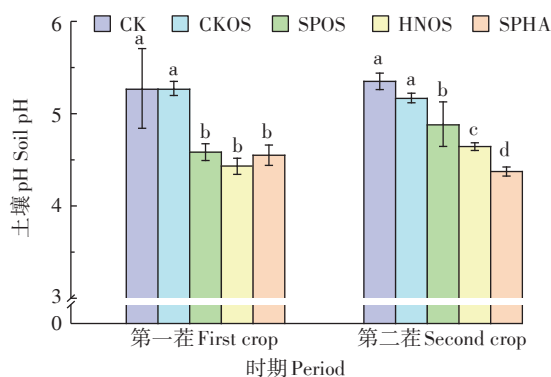
植物Cd移除量即植物地上部分Cd的积累量之和,以植物地上部不同部位干质量与其Cd含量的乘积之和表示。采用Microsoft Excel 2016和SPSS 20.0软件进行试验数据统计,采用ANOVA中Duncan多重比较法($P<0.05$)进行差异显著性分析和Pearson双变量相关性分析,采用Canoco 4.5绑定AI图片处理软件进行主成分分析(Principal components analysis, PCA),采用Origin 9.0软件制图。

2 结果与分析

2.1 植物轮作模式对土壤Cd有效性的影响

2.1.1 植物轮作过程中土壤pH的变化

土壤pH是影响Cd有效性的重要因素之一,不同植物轮作模式下土壤pH为4.37~5.35(图1)。试验前,供试土壤pH为4.65,不同植物轮作下土壤pH明显上升或下降,其中第一茬土壤pH为4.43~5.27,第二茬土壤pH为4.37~5.35。与试验前土壤相比,CK和CKOS处理土壤pH明显升高,且两茬均显著高于其他植物轮作模式,但CK和CKOS处理之间差异不显著。其原因是在淹水还原条件下,无论酸性土壤还是碱性土壤,其土壤pH均会趋于中性。同样,第一茬后SPOS、HNOS和SPHA处理土壤pH较试验前均略有下降,而第二茬后SPOS和HNOS处理(第二茬植物均为水稻)土壤pH又明显上升,而SPHA处理(第二茬植物为油葵)土壤pH再次下降了0.18个单位。SPOS、HNOS和SPHA处理第一茬植物均属旱作,但



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 differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 植物轮作过程中土壤pH的变化

Figure 1 Changes of soil pH with different plant rotation

HNOS处理土壤pH较SPOS和SPHA处理低0.12~0.15个单位,这可能是与高积累油菜根系相对伴矿景天分泌更多的有机酸导致土壤pH下降有关。由此可见,土壤水分状况和植物类型均对pH有较大影响。

2.1.2 植物轮作过程中土壤Cd含量的变化

土壤Cd含量是表征土壤污染程度的重要指标,不同植物轮作模式对土壤Cd含量的影响见图2。试验前土壤Cd含量为 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,植物轮作过程中土壤Cd含量有不同程度的升高或降低。第一茬植物收获后土壤Cd含量为 $0.70 \sim 0.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,SPOS和SPHA处理土壤Cd含量最低,分别为 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见,伴矿景天对降低土壤Cd含量效果最好。而第二茬植物收获后土壤Cd含量均有不同程度的升高($0.93 \sim 1.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但这并不表示第二茬植物对土壤Cd的吸收没有效果。出现这种结果的原因主要可能有两个方面:一是农田土壤具有不均一性,植物根系可能造成根际周边小范围土壤Cd的富集或降低,这对土壤Cd含量的影响较大;二是大气沉降等外源输入Cd的贡献,课题组前期对该研究区大气沉降、灌溉水和农业投入品等土壤Cd输入进行了连续两年的定位监测,发现每年大气沉降和灌溉水对农田土壤Cd积累具有重要贡献,仅大气沉降对土壤Cd积累的贡献平均每年就达 $27.5 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总体而言,与CK相比,不同植物轮作两茬植物收获后土壤Cd含量均有下降,其中CKOS、SPOS和SPHA处理第二茬后土壤Cd含量较低,且CKOS和SPOS处理变异较小。因此,从对土壤Cd含量减少情况来看,当地主栽品种早稻与高积累品种晚稻轮作和伴矿景天与高积累品种晚稻轮作是该研究区中轻度Cd污染农田安全利用

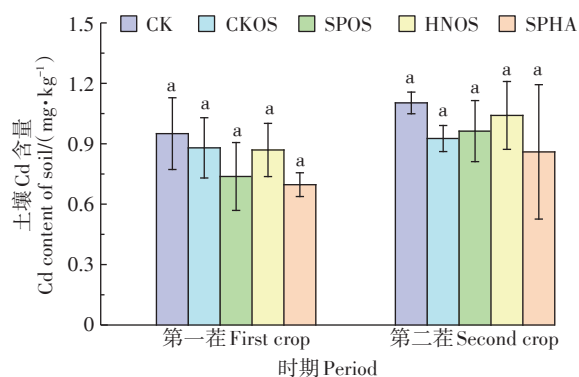


图2 植物轮作过程中土壤Cd含量的变化

Figure 2 Changes of soil Cd content with different plant rotation

可以推荐的植物轮作模式。

2.1.3 植物轮作过程中土壤有效态Cd含量的变化

淹水使土壤pH由酸性向中性变化,土壤氧化还原电位(Eh)下降,亚铁离子(Fe^{2+})及无定型氧化铁含量增加,从而影响土壤有效态Cd含量。不同植物轮作下土壤有效态Cd含量的变化如图3所示。试验前土壤有效态Cd含量为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与试验前相比,第一茬HNOS处理土壤有效态Cd含量显著升高,而其他处理均有所下降,可能是因为油菜根系分泌物的活化作用,且油菜对Cd的吸收有限。与试验前相比,第一茬SPOS和SPHA处理土壤有效态Cd含量分别下降了37.14%和34.29%,均显著低于其他处理,这可能与伴矿景天对土壤有效态Cd的大量吸收有关。不同植物轮作处理第二茬植物收获后土壤有效态Cd含量相差较小,但明显高于第一茬。其中SPOS和SPHA处理土壤有效态Cd含量较第一茬分别升高了95.51%和95.72%,第一茬因伴矿景天对土壤Cd超量吸收而显著降低了土壤有效态Cd含量,而第二茬植物收获

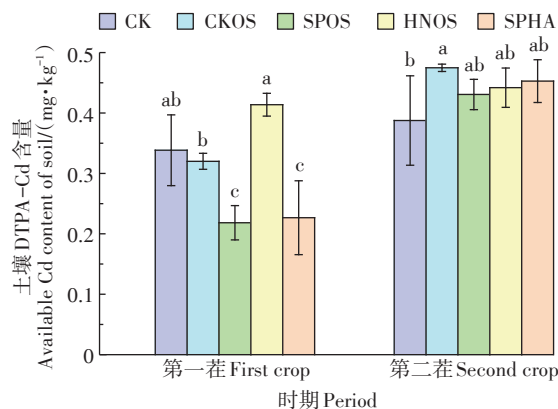


图3 植物轮作过程中土壤有效态Cd含量的变化

Figure 3 Changes of soil available Cd content with different plant rotation

后土壤有效态Cd含量又明显升高且与其他处理无显著差异。前期研究发现,土壤有效态Cd含量较高可以促进伴矿景天对Cd的吸收和积累,提高伴矿景天的修复效率。因此,该轮作模式更有利于次年伴矿景天的修复,从土壤有效态Cd含量变化来看,伴矿景天与高积累晚稻轮作是该研究区修复Cd污染土壤可推荐的植物轮作模式。

2.1.4 植物轮作过程中土壤Cd有效性的变化

植物对土壤Cd的吸收或根系分泌物引起的土壤Cd形态转化等均会影响土壤Cd有效性。不同植物轮作下土壤Cd有效性变化如图4所示。试验前,供试土壤Cd有效性为42.17%。第一茬HNOS处理土壤Cd有效性较试验前升高了8.47个百分点,显著高于SPOS处理,主要是因为油菜收获后土壤pH明显下降,土壤有效态Cd含量升高,而土壤Cd含量与试验前变化较小。除HNOS处理外,其他处理土壤Cd有效性(31.52%~37.17%)较试验前下降了5.00~10.65个百分点,各处理间无显著差异。第二茬植物收获后土壤Cd有效性为35.21%~51.39%,其中CK处理土壤Cd有效性最低,但各处理间无显著差异。可能是除CK处理外,其他处理第二茬作物均为高积累品种水稻或油菜,其根系分泌有机酸等,土壤pH较低,土壤有效态Cd含量较高,且植物对土壤Cd的大量吸收和积累使土壤Cd含量下降。土壤Cd有效性是影响伴矿景天修复效率的重要因素之一,这也进一步说明伴矿景天与高积累晚稻轮作是中轻度Cd污染农田安全利用较好的植物轮作模式。

2.2 植物不同部位Cd含量及与土壤指标的关系

2.2.1 植物中不同部位Cd含量

植物对重金属的耐性和高积累性是其作为植物修复材料的前提。轮作过程中,两茬植物均能正常生长,没有出现明显的受重金属毒害症状。轮作处理植

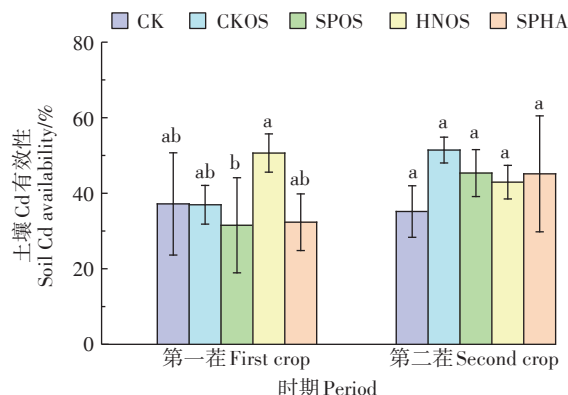


图4 植物轮作过程中土壤Cd有效性的变化

Figure 4 Changes of soil Cd availability with different plant rotation

物不同部位Cd含量见表2。第一茬植物地下部和地上部Cd含量均表现为SPOS和SPHA处理(伴矿景天)显著高于其他处理,且SPOS与SPHA处理间伴矿景天地下部或地上部Cd含量相差较小,地上部Cd含量分别可达 $54.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $55.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;第一茬CK与CKOS处理间(当地主栽品种早稻)不同部位Cd含量也相差较小,但其糙米Cd含量均远超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中糙米Cd的限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);HNOS处理(油菜)地上部不同部位Cd含量与水稻对应部位Cd含量均相差较小,但油菜地下部Cd含量($2.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)仅是当地主栽品种早稻地下部Cd含量的一半左右。

第二茬植物除SPHA处理外,其他处理均是水稻。由表2可以看出,CKOS、SPOS和HNOS处理(均为高积累晚稻)秸秆Cd含量为 $7.90 \sim 8.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处理间无显著差异,但均显著高于CK,即与当地主栽品种晚稻相比,高积累品种晚稻秸秆Cd含量高出47.11%~57.91%,且SPOS处理中水稻秸秆Cd含量最高。SPHA处理是第二茬植物中唯一的旱作植物,油

表2 植物不同部位Cd含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 The Cd contents in different parts of plant ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	第一茬 First crop				第二茬 Second crop			
	地下部 Underground	地上部 Aboveground			地下部 Underground	地上部 Aboveground		
		糙米 Rice	谷壳 Husk	秸秆 Straw		糙米 Rice	谷壳 Husk	秸秆 Straw
CK	4.03±2.43	0.97±0.10	2.12±0.49	2.75±0.75	14.07±3.22a	1.92±0.21a	2.32±0.12ab	5.37±0.81b
CKOS	5.06±2.14	1.06±0.11	1.90±0.52	3.13±0.24	16.13±2.90a	2.11±0.09a	2.10±0.08ab	7.90±0.85a
SPOS	26.67±4.68		54.93±4.04		19.63±5.26a	2.17±0.39a	2.52±0.45a	8.48±1.37a
HNOS	2.25±0.19	1.21±0.17(籽)	1.85±0.41(壳)	3.63±0.21	18.16±3.33a	2.33±0.54a	1.88±0.18b	8.10±1.75a
SPHA	25.60±3.91		55.23±8.24		2.90±0.40	3.29±0.37(花)	7.41±0.76(叶)	3.41±0.32(秆)

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表3 植物不同部位Cd积累量及移除量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 3 The amount of Cd accumulation and removal in different parts of plant($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	第一茬 First crop		第二茬 Second crop		Cd 移除量 Amount of Cd removal
	地下部积累量 Amount of Cd accumulation in underground part	地上部积累量 Amount of Cd accumulation in aboveground part	地下部积累量 Amount of Cd accumulation in underground part	地上部积累量 Amount of Cd accumulation in aboveground part	
CK	4.05±0.75a	32.14±1.73b	11.30±2.70a	53.40±5.28b	91.23±3.56bc
CKOS	3.30±1.95a	29.68±6.79b	14.62±1.21a	70.82±6.67a	101.24±8.12bc
SPOS	3.60±0.30a	75.86±8.31a	16.14±4.35a	74.12±9.88a	150.34±12.11a
HNOS	3.00±0.15a	13.81±0.53c	14.28±2.69a	70.41±13.11a	84.24±12.81c
SPHA	3.45±0.30a	81.34±6.32a	3.60±0.15b	21.54±1.02c	103.42±7.14b

葵不同部位Cd含量最高的是叶片,可达 $7.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,油葵花和秆Cd含量也较高,分别为 $3.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外,油葵地上部不同部位Cd含量均明显高于根部。

本研究选取的植物不同部位Cd的富集系数(不同部位Cd含量与土壤Cd含量的比值)为1.03~78.80。伴矿景天地上部和地下部Cd含量均显著高于其他植物,除伴矿景天外,其他植物地上部富集系数为1.03~8.82。高积累晚稻秸秆Cd含量显著高于当地主栽品种,但不同品种水稻糙米Cd含量无显著差异。油葵地上部Cd含量均高于根部,其中叶片富集系数达8.82。此外,水稻和油葵种植及田间管理技术成熟,具有一定的经济价值,便于大众接受。因此,从植物Cd吸收和富集系数来看,除伴矿景天外,高积累水稻和油葵在植物修复中都具有较大的应用潜力。

2.2.2 植物轮作模式对农田土壤Cd修复潜力分析

植物不同部位Cd积累量是其生物量与Cd含量的乘积,地上部Cd积累量是修复植物筛选的重要参考指标之一。由表3可以看出,第一茬植物地下部Cd积累量处理间无显著差异,为 $3.00\sim 4.05\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$;不同植物地上部Cd积累量差异显著,伴矿景天地上部Cd积累量(均高于 $75.00\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($13.81\sim 32.14\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)。晚稻地下部Cd积累量($11.30\sim 16.14\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理间无显著差异,均显著高于油葵($3.60\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$),但高积累水稻地上部Cd积累量($70.41\sim 74.12\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于当地主栽品种($53.40\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)。Cd移除量是两茬植物地上部Cd积累量之和。由表3可以看出,不同植物轮作模式Cd移除量为 $84.24\sim 150.34\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,即通过轮作,一年通过植物带走的Cd最高可达 $150.34\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,从植物Cd积累量和移除量来看,伴矿景天与高积累晚稻轮作在

中轻度Cd污染农田土壤植物修复轮作模式中具有较大的应用潜力。

2.2.3 植物Cd含量与土壤相关指标的PCA分析

将植物各部位Cd含量与土壤相关指标(土壤pH、Cd含量、有效态Cd含量和Cd有效性)进行PCA分析。从图5可以看出,第一茬PCA揭示的主成分1(PC1)和主成分2(PC2)的贡献率分别为93.6%和4.4%,累积方差贡献率达98.0%,具有统计学意义。结合Pearson相关性分析发现,植物地上部Cd含量与土壤pH显著负相关($P<0.05$),说明土壤pH在一定程度上影响植物Cd的吸收。植物地上部和地下部Cd含量显著正相关($P<0.01$),即植物地下部Cd含量越高,其地上部Cd累积量也越高。而与其他研究结果不一致的是,第一茬土壤有效态Cd含量与植物地上部Cd含量和地下部Cd含量均显著负相关($P<0.01$),相关系数分别高达0.835和0.845,这可能与伴矿景天超量吸收土壤中的Cd有关。依据主要是第一茬种植伴矿景天的处理与其他植物处理相比:土壤pH明显降低;土壤Cd含量明显降低;植物不同部位Cd含量显著升高。

第二茬PCA揭示的PC1和PC2的贡献率分别为61.1%和29.4%,累积方差贡献率达90.5%,具有统计学意义。结合Pearson相关性分析发现,第二茬植物地下部Cd含量、糙米或花Cd含量、谷壳或叶Cd含量及秸秆Cd含量与土壤有效态Cd含量均无显著相关性,但植物地上部Cd含量与土壤有效态Cd含量显著正相关($P<0.01$)。土壤pH与植物地上部Cd含量显著负相关($P<0.05$),这与第一茬研究结果类似。

3 讨论

3.1 植物轮作对土壤pH及Cd有效性的影响

不同植物的根系作用和土壤水分的变化对土壤

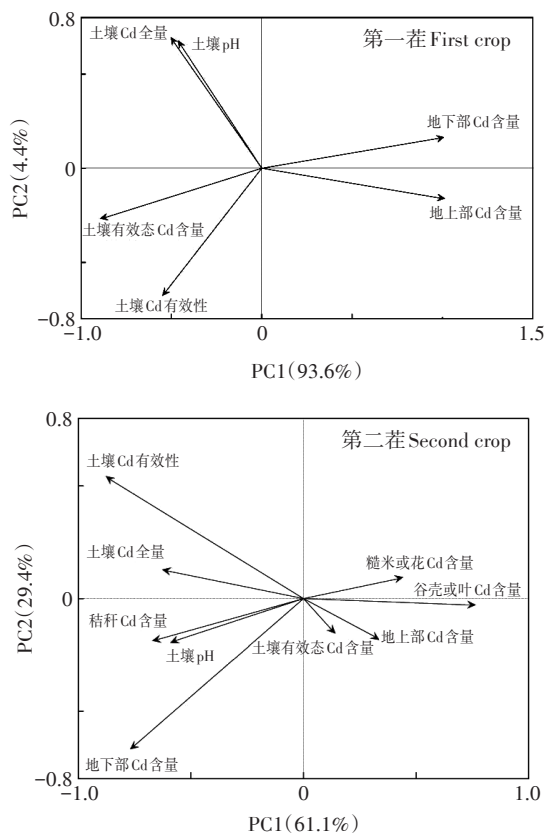


图5 基于PCA分析的植物与土壤指标之间的相关性
Figure 5 Correlations between parameters of soil and plants based on PCA analysis

pH有较大影响^[15-16]。第一茬旱作植物(伴矿景天和Cd高积累品种油菜)处理土壤pH显著低于水稻处理,第二茬旱改水处理(SPOS和HNOS)土壤pH较第一茬明显升高,但仍显著低于水稻连作处理(CK和CKOS),而旱旱连作处理(SPHA)第二茬土壤pH进一步下降,但与试验前土壤pH无显著差异。土壤pH是影响土壤重金属有效态含量及有效性的重要因素^[17-18],第一茬和第二茬土壤pH与土壤Cd有效态含量均呈显著负相关($P<0.01$)。此外,植物对土壤Cd的吸收也影响土壤Cd有效态含量的变化^[19]。本研究中,伴矿景天相对于水稻或油菜具有更高的Cd积累能力,第一茬SPOS和SPHA处理土壤有效态Cd含量显著低于其他处理,这与伴矿景天Cd积累量较大有关。油菜(HNOS)不同部位Cd含量与水稻不同部位Cd含量相差较小,但由于油菜根系分泌物的作用导致其根际土壤pH下降,从而引起土壤Cd有效态含量升高,且明显高于水稻处理。第二茬SPOS处理土壤Cd有效态含量显著升高,可能是旱改水还原条件下,土壤中由铁离子(Fe^{3+})和四价锰离子(Mn^{4+})结合的铁

锰氧化物被还原成 Fe^{2+} 和二价锰离子(Mn^{2+}),使铁锰氧化物吸附的镉离子(Cd^{2+})解吸出来,从而增加了土壤有效态Cd含量,提高了土壤Cd的有效性^[20-21]。也有研究发现,当土壤为还原条件时,土壤中硫离子(S^{2-})大量存在,而 S^{2-} 与游离态 Cd^{2+} 等易形成硫化镉(CdS)沉淀^[22]。此外,还原条件下铁锰氧化物生成的新的氧化物会增加土壤对Cd的吸附能力,从而降低土壤Cd的生物有效性^[23]。因此,铁锰氧化物和有机质溶解等也会改变土壤pH和Eh,进而影响Cd的沉淀-溶解平衡^[24]。水分调控措施应根据土壤pH、Eh、铁锰氧化物和有机质等因素综合分析,进一步研究其可行性。

3.2 植物轮作模式对中轻度Cd污染土壤的修复潜力分析

近年来,超积累植物在修复重金属污染土壤方面已得到大面积应用和示范,而一些高生物量或生长周期较短的非超积累植物或重金属耐性植物在污染土壤修复中也引起广泛关注。要评价某种植物能否作为重金属污染土壤的植物修复物种,要依据该植物在Cd污染土壤中生长情况即生物量和生长速度等生理指标和植物对Cd的吸收、积累和转运能力^[25-26]。富集系数是判定植物对Cd富集能力的重要参考系数^[27]。结合图2和表2可知,不同植物各部位Cd的富集系数为1.03~78.80,除伴矿景天外,其他植物的富集系数为1.03~8.82。其中油菜秸秆中Cd含量可达 $3.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,油菜叶片中Cd含量可达 $7.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与种植常规作物品种相比,选用Cd高积累品种作物组合轮作均可有效吸收并积累土壤Cd,对降低土壤Cd含量具有重要的作用。本研究中伴矿景天与高积累晚稻轮作的植物Cd移除量达 $150.34 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,两茬植物收获后土壤Cd含量较其他处理明显降低,第一茬后土壤有效态Cd含量较低,而第二茬后与其他处理无显著差异,该轮作模式更有利于伴矿景天的吸取修复。植物通过化学合成和有机物质输入等方式影响土壤理化性质,植物对土壤理化性质等影响反过来又会改变土壤对植物养分的供给能力,从而影响植物生长和Cd吸收等^[28]。因此,土壤Cd污染修复中植物的选择不仅要考虑植物的Cd吸收性能,而且土壤理化性质的改变对植物生长和Cd吸收的影响也不容忽视。本研究中第一茬植物收获后SPOS和SPHA处理有效态Cd含量显著下降,而第一茬HNOS处理土壤有效态Cd含量明显升高,且伴矿景天与油菜生长期接近,因此,伴矿景天与油菜间套作可进一步提高伴矿景天对

Cd的吸收,从而有效降低土壤Cd含量。

本研究的目的在于寻求一种适宜当地污染条件下的“边修复边利用”的种植模式。本研究所推荐的种植模式下,高积累品种晚稻糙米Cd含量超过了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中糙米Cd的限值,油菜Cd含量高达 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。修复过程中植物收获后应离田并进行安全处置,避免Cd超标农产品进入食物链而引起人体健康风险,或植物中的Cd再次输入农田土壤造成土壤Cd的积累。

4 结论

(1)与试验前相比,伴矿景天收获后土壤Cd含量降低了10.84%和15.66%,有效态Cd含量下降了37.14%和34.29%,其中伴矿景天与高积累晚稻轮作Cd移除量达 $150.34 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时,水旱轮作有效提高了土壤pH。因此,伴矿景天与高积累晚稻轮作可考虑作为修复Cd污染农田的植物轮作模式。

(2)第一茬种植油菜处理土壤pH最低,而其土壤有效态Cd含量最高,且油菜与伴矿景天的生长期接近,因此,伴矿景天与油菜间套作可作为冬春季节修复Cd污染农田土壤的备选种植模式。

(3)伴矿景天与油菜间套作、伴矿景天与高积累晚稻轮作等种植模式在Cd污染农田土壤修复中具有较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] WANG G B, ZHANG Q Q, DU W C, et al. Microbial communities in the rhizosphere of different willow genotypes affect phytoremediation potential in Cd contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 145224.
- [2] ZHANG J W, CAO X R, YAO Z Y, et al. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: Efficiency comparison and cost-benefit analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 7: 126489.
- [3] 于玲玲, 朱俊艳, 黄青青, 等. 油菜-水稻轮作对作物吸收累积镉的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 1-6, 12. YU L L, ZHU J Y, HUANG Q Q, et al. Bioavailability of cadmium in the rotation system of oilseed rape and rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1): 1-6, 12.
- [4] 焦玉字, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 不同向日葵品种对镉积累差异性的田间研究[J]. 作物杂志, 2018(6): 89-95. JIAO Y Z, GUO J M, YANG J X, et al. Field study on variety difference of cadmium accumulation in sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. *Crops*, 2018(6): 89-95.
- [5] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 529-532. LI K Q, LIU J G, LU X L, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 529-532.
- [6] IBARAKI T, KUROYANAGI N, MURAKAMI M. Practical phytoextraction in cadmium-polluted paddy fields using a high cadmium accumulating rice plant cultured by early drainage of irrigation water[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55: 421-427.
- [7] ISHIKAWA S, NORIHARU A E, MURAKAMI M, et al. Is *Brassica juncea* a suitable plant for phytoremediation of cadmium in soils with moderately low cadmium contamination? Possibility of using other plant species for Cd-phytoextraction[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52: 32-42.
- [8] MARCHIOL L, ASSOLARI S, SACCO P, et al. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(1): 21-27.
- [9] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藜蒿 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2453-2459. ZHANG Y X, SONG B, BIN J, et al. Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2453-2459.
- [10] 李争艳, 徐智明, 师尚礼, 等. 江淮地区不同轮茬作物对苜蓿产量及根际土壤质量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(8): 28-39. LI Z Y, XU Z M, SHI S L, et al. Effects of different crop rotation on alfalfa yield and soil quality in the Jiang-Huai area[J]. *Acta Prataculturae sinica*, 2019, 28(8): 28-39.
- [11] VAN DER HEIJDEN M G A, BARDGETT R D, VAN STRAALEN N M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(3): 296-310.
- [12] 王淑彬, 王礼献, 杨文亭, 等. 南方不同“冬种+双季稻”种植模式对土壤有机碳和作物产量的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6603-6610. WANG S B, WANG L X, YANG W T, et al. Effects of multiple winter cropping on soil organic carbon and double-cropping rice yield in the south of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6603-6610.
- [13] HUANG S H, RAO G S, ASHRAF U, et al. Application of inorganic passivators reduced Cd contents in brown rice in oilseed rape-rice rotation under Cd contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127404.
- [14] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 688-695. YANG Y, CHEN Z P, LI H L, et al. The potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 688-695.
- [15] SUN L N, CHEN S, CHAO L, et al. Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 79(5): 514-518.
- [16] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对pH、Eh、Fe及有效态Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1508-1517. ZHU D M, LIU Y, ZHANG L, et al. Effects of pH, Eh, Fe, and flooded

- time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1508-1517.
- [17] MAES A, VANTHUYNE M, CAUWENBERG P, et al. Metal partitioning in a sulfidic canal sediment: Metal solubility as a function of pH combined with EDTA extraction in anoxic conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 312(1/2/3):181-193.
- [18] KASHEM M A, SINGH B R. Transformations in solid phase species of metals as affected by flooding and organic matter[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(9/10):1435-1456.
- [19] 张海伟. 甘蓝型油菜磷高效的生理机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009. ZHANG H W. Study on physiological mechanisms of phosphorus efficiency in *Brassica napus*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [20] MARSCHNER H, RÖMHELD V, ÇAKMAK I. Root-induced changes of nutrient availability in the rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1987, 10:1175-1184.
- [21] REYNOLDS J G, NAYLOR D V, FENDORF S E. Arsenic sorption in phosphate-amended soils during flooding and subsequent aeration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5):1149-1156.
- [22] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1):182-188. CHEN S, SUN L N, SUN T H, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1):182-188.
- [23] KASHEM M A, SINGH B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(3):247-255.
- [24] LIU C C, LIU Y C. Reclamation of copper-contaminated soil using EDTA or citric acid coupled with dissolved organic matter solution extracted from distillery sludge[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178:97-101.
- [25] ZHU Q H, HUANG D Y, LIU S L, et al. Accumulation and subcellular distribution of cadmium in ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud.) planted on elevated soil cadmium contents[J]. *Plant Soil and Environment*, 2013, 59(2):57-61.
- [26] 曹雪莹, 谭长银, 谢雨呈, 等. 土壤pH和Cd全量对伴矿景天修复效率的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9):1604-1612. CAO X Y, TAN C Y, XIE Y C, et al. Effect of soil pH and total cadmium concentration of soil on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Research of Environmental Science*, 2019, 32(9):1604-1612.
- [27] WU L H, ZHOU J W, ZHOU T, et al. Estimating cadmium availability to the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in a wide range of soil types using a piecewise function[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638:1342-1350.
- [28] KULMATISKI A, KARDOL P. Getting plant-soil feedbacks out of the greenhouse: Experimental and conceptual approaches[M]. Springer: Progress in Botany, 2008:449-472.

(责任编辑:李丹)