

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

苎麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究

刘冲,赵玲,李秀华,傅赵聪,刘方,滕应

引用本文:

刘冲,赵玲,李秀华,等. 苎麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1034-1042.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1249

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EDDS与EDTA强化苎麻修复镉铅污染土壤

刘金, 殷宪强, 孙慧敏, 吕家珑, 韦革宏 农业环境科学学报. 2015(7): 1293-1300 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.010

我国含磷肥料中镉和砷土壤累积风险分析

余垚,朱丽娜,郭天亮,黄青青,王琪,陈清,李花粉 农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1326-1331 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0715

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征

高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 白玲玉, 王亚男, 陈清, 赵会薇, 苏世鸣 农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2541-2548 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0908

秸秆覆盖还田对稻麦轮作体系中土壤及作物甲基汞累积的影响

陈宗娅, 王永杰, 舒瑞, 付芳婧, 吴永贵 农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1931-1936 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0494

硒镉高背景区茶叶中硒和砷、汞、镉的积累与浸出特征研究

杨如意,杨程,石晓菁,张梦婷,高业能 农业环境科学学报.2019,38(9):2023-2030 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0258



关注微信公众号,获得更多资讯信息

刘 冲,赵 玲,李秀华,等. 苎麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1034-1042. LIU Chong, ZHAO Ling, LI Xiu-hua, et al. Accumulation and transfer of mercury and cadmium in ramie from agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1034-1042.



苎麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究

刘 冲1,2,赵 玲2,李秀华2,3,傅赵聪2,刘 方1*,滕 应2*

(1.贵州大学资源与环境工程学院,贵阳 550025; 2.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所),南京 210008; 3.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了评价非食用性经济植物苎麻对农田土壤中汞、镉的累积修复效果,本研究采集了46个种植于某汞矿区周边的汞、镉 复合污染农田土壤的苎麻样品,分析了苎麻及对应土壤样品中汞、镉含量,计算了苎麻对汞、镉的累积系数和转运系数。结果表 明:汞在苎麻根、秆、皮和叶中的含量分布为58.02~136.97、60.6~560.45、113.26~3 860.51、446.1~1 686.3 µg·kg⁻¹;镉在苎麻根、秆、 皮和叶中的含量分布为10.1~1 527.8、7.17~1 203.63、11.57~1 838.14、77.12~842.41 µg·kg⁻¹。麻皮和麻叶中的汞含量明显高于根部; 而镉较均匀分布在苎麻的根部、麻秆、麻皮及麻叶。汞和镉在对应土壤中含量分布为0.381~9.040 mg·kg⁻¹和0.131~7.814 mg·kg⁻¹。 苎麻地上部对汞的累积系数范围为0.017~4.826,转运系数范围为0.583~22.595,苎麻地上部对镉的累积系数范围为0.011~3.725,转 运系数范围为0.055~16.175。麻皮的汞累积系数明显高于根部和麻秆;而苎麻各部位的镉累积、转运系数无明显差别。土壤中的 DOC含量上升会导致苎麻麻秆、麻皮中汞含量的下降,土壤pH的下降会促进苎麻的麻秆、麻皮两个部位对镉的吸收累积。 **关键词**:苎麻;汞;镉;土壤;累积

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-1034-09 doi:10.11654/jaes.2019-1249

Accumulation and transfer of mercury and cadmium in ramie from agricultural soils

LIU Chong^{1,2}, ZHAO Ling², LI Xiu-hua^{2,3}, FU Zhao-cong², LIU Fang^{1*}, TENG Ying^{2*}

(1.Resource and Environmental Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ramie (*Boehmeria nivea* L. *Gaud*) is not only a highly economical and non-edible plant, but also an effective plant for heavy metal remediation. In order to evaluate the remediation efficiency of mercury (Hg) and cadmium (Cd) by ramie, 46 ramie and the corresponding soil samples were gathered from agricultural soils located around a mercury mine near Tongren in Guizhou Province. The amounts of Hg and Cd in ramie and the corresponding soil samples were analyzed. The bioaccumulation factor (BAF) and translocation factor (TF) of Hg and Cd were also calculated. The amount of Hg in the root, stem, skin, and leaves of ramie was in the range of 58.02~136.97, 60.6~ 560.45, 113.26~3 860.51 μ g·kg⁻¹, and 446.1~1 686.3 μ g·kg⁻¹, respectively. The amount of Cd in the root, stem, skin, and leaves of ramie was in the range of 10.1~1 527.8, 7.17~1 203.63, 11.57~1 838.14 μ g·kg⁻¹, and 77.12~842.41 μ g·kg⁻¹, respectively. The amount of Hg was much higher in ramie skin and leaves than in ramie roots. However, the amount of Cd was evenly distributed in the roots, stem, skin, and leaves of ramie. The BAF and TF of Hg were in the range of 0.017~4.826 and 0.583~22.595, respectively. The BAF and TF of Cd were in the range of 0.011~3.725 and 0.055~16.175, respectively. The BAF of Hg was much higher in ramie leaves than in ramie stem and roots. However, there was no significant difference in the BAF of Cd among the roots, stem, skin, and leaves of ramie. The increase in dissolved or-

收稿日期:2019-11-14 录用日期:2020-02-05

作者简介:刘 冲(1994—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复与安全利用。E-mail:15761630850@163.com *通信作者:刘 方 E-mail:lfang6435@163.com; 滕 应 E-mail:yteng@issas.ac.cn

基金项目:云南省重大科技专项子课题(2016ZF001-1);云南省科技计划项目子课题(2017IB038)

Project supported: The Major Science and Technique Programs in Yunnan Province (2016ZF001-1); The Science and Technique Programs in Yunnan Province(2017IB038)

ganic carbon content in the soil led to the decrease in Hg in the stem and skin of ramie, but the decrease in soil pH promoted the uptake and accumulation of Cd in the stem and skin of ramie.

Keywords: ramie; mercury; cadmium; soil; accumulation

2014年全国土壤污染状况调查公报显示:我国 耕地土壤环境质量堪忧,耕地土壤点位超标率为 19.4%,主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和 多环芳烃等,其中镉、汞的点位超标率达到7.0%和 1.6%。汞具有极强的神经毒性和致畸形,并且累积 效应和遗传毒性显著凹。镉是毒性极大的重金属元 素,在土壤、水、大气中具有很高的迁移性四。我国贵 州省铜仁地区拥有丰富的汞矿资源,长期汞矿开采与 冶炼活动不仅导致当地农田土壤汞污染较为严重,土 壤汞含量最高可达129.4 mg·kg^{-1[3-4]},还导致多种农产 品可食部位的汞含量超标。研究表明,铜仁地区空心 菜、白菜、辣椒和玉米等农产品中汞的含量分别达到 0.168、0.222 9、0.521 9 mg·kg⁻¹和 0.039 7 mg·kg⁻¹;辣 椒中的镉含量为0.065 mg·kg^{-1 [4]},远高于《食品安全 国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2012)规定 的汞、镉含量限值。种植对重金属具有修复功能的非 食用性经济植物,是一种切断重金属从污染农田土壤 进入食物链、降低重金属人体健康风险的有效措施。

苎麻又名"中国草",是多年生草本植物,生长迅 速,生物量大,是中国传统的经济作物和重要的纺织 原料。研究显示,苎麻具有较强的汞、镉耐受能力和 累积能力^[5-6]。苎麻对汞的耐受阈值可达到130 mg· kg⁻¹,累积系数最高可达0.32,转运系数最高可达 0.91[7-8]; 苎麻的镉含量是一般植物的 2~10 倍, 对镉的 累积系数最高可达2.1,转运系数最高可达3.0^[9-10]。 但是,苎麻对汞、镉的累积特性研究大部分都是基于 盆栽试验和人为制备污染土的研究结果[7.11-17],且对 汞、镉复合污染的研究较少。

为此,本研究对铜仁地区某乡镇农田种植的苎麻 和对应的土壤样品进行采集,定量分析了土壤中汞、 镉含量、pH、DOC和对应苎麻根部、麻秆、麻皮及麻叶 中的汞、镉含量,在此基础上,计算了苎麻对汞、镉的 累积系数和转运系数,以期明确实际田间种植条件下 苎麻对汞、镉的吸收累积特征,为苎麻作为汞镉复合 污染农田土壤修复植物提供科学依据。

材料与方法 1

1.1 研究区概况

铜仁地区部分农田汞、镉污染通过食物链对人体

健康造成了潜在危害[18]。研究区是位于贵州省铜仁 市某乡镇的农田区域,位置坐标为东经109°15′05″, 北纬27°27′33.72″,海拔高度为441 m,属于中亚热带 季风湿润气候,年平均气温16.1℃,年平均降水量 1400 mm,常年主导风向为东北风^[19]。该农田区域原 为水稻种植区,在当地政府引导下进行了种植结构调 整,统一种植了约6.67 hm²苎麻。苎麻的移栽种植时 间为2018年4月,品种为湘饲苎一号。对研究区的土 壤进行调查分析,土壤汞含量0.381~9.040 mg·kg⁻¹, 土壤镉含量 0.131~7.814 mg·kg⁻¹, 有机质含量为 15.16~24.14 g·kg⁻¹, 全氮含量为 0.96~1.62 g·kg⁻¹, 全 磷含量为0.50~0.65 g·kg⁻¹,全钾含量为17.47~24.51 g·kg⁻¹,阳离子交换量为7.82~10.66 cmol·kg⁻¹。

1.2 样品的采集与测定

采样时间为2018年11月22-23日,多云,气温 为20℃/6℃,此前一周天气为小雨。此时为苎麻移 栽后的第7个月,属当年二麻收获前夕,株高约为80 cm。整个研究区有140余个零散小田块,按照灌溉地 形将其划分为46个地块,每个地块面积区间为800~ 1200 m²。每个地块采用5点采样法采集5穴的苎麻 样,采样面积为2m×2m。同时,在采集每穴苎麻时 收集该穴根部 0~20 cm 的土壤,5 穴混合均匀后采用 四分法分样,每地块最后获得1000g新鲜土壤样品。 一共采集苎麻样品46份,对应的土壤样品46份。图 1为采样点位示意图。

植物样品先用蒸馏水冲洗掉泥土后,再将其所有 的根部、麻秆、麻皮和麻叶样品分开收集,随后自然风 干再进行冷冻干燥。用粉碎机将植物样品进行粉碎, 过60目筛。土壤样品经冷冻干燥后研磨过100目筛。

土壤汞的测定:称取0.2000g土壤样品于具塞试 管中加入5mL王水(盐酸:硝酸:水=3:1:4)沸水浴消 解2h,每30min摇晃一次试管,消解完后用5%盐酸 定容至25 mL^[20]。结果显示,空白加标回收率为 86.2%~113.8%,符合质量控制标准。

植物样品汞的测定:称取0.2000g植物样品于聚 四氟乙烯罐中,加入5 mL HNO3和3 mL H2O2,放入烘 箱140℃下消解4h,自然冷却后,超声脱气2min,将 消化液用5%盐酸定容到25 mL。结果显示,空白加 标回收率为83.6%~116.4%,符合质量控制标准。



图1 采样点位示意图

Figure 1 The sampling sites of research area

土壤镉的测定:称取 0.200 0 g 土壤样品于聚四 氟乙烯罐中加入4 mL 王水(盐酸:硝酸=3:1)和1 mL HClO4,在 105 ℃下消解6 h,冷却后在电炉上赶酸至1 mL,消解液用 5% 盐酸定容至 25 mL^[5,21]。结果显示, 空白加标回收率为 80%~120%,符合质量控制标准。

植物样品镉的测定:称取0.2000g植物样品于聚 四氟乙烯罐中,加入6mLHNO₃和2mLH₂O₂,放入烘 箱140℃下消解6h,冷却后在电炉上赶酸至1mL,将 消化液用5%盐酸定容到25mL¹¹⁸¹。结果显示空白加 标回收率为93.5%~106.5%,符合质量控制标准。

通过原子荧光光度计(北京宝德-AFS-2000)和 石墨炉原子吸收光谱法(PerkinElmer-PinAAcle900Z) 分别测定汞和镉的含量,消解过程中选用生物成分分 析标准物质-芹菜[GBW10048(GSB26)]和土壤成分 分析标准物质[GBW07405(GSS-5)]进行消解质量控 制,每10个样品加入一个平行样进行质量控制,测定 过程中则采用每10个样品加入一个标准单位样品(1 μg·kg⁻¹)进行质量控制,采用平均值表示测定结果。 结果显示,重复样品的变异系数为0.4%~6.9%。

参照鲍士旦的《土壤农化分析》进行土壤理化性 质测定。土壤pH采用1:2.5土液比浸提,pH计测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮含 量采用半微量开氏法测定;全磷含量采用HCIO4-HF 消解-钼锑抗比色法测定;全钾含量采用火焰光度计 测定。土壤阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法-中和滴定法测定。 土壤溶解性有机碳(DOC)测定:称取10g新鲜土 壤样品至50mL离心管中,加入40mL蒸馏水,常温 下振荡提取40min,5000r·min⁻¹离心15min,上清液 过0.45μm滤膜后,用MultiN/C3100总有机碳(TOC) 测定仪测定DOC含量。每个处理重复测定3次,采用 平均值表示测定结果^[22]。

1.3 数据处理

数据采用 Excel 进行常规分析。用 SPSS 24数据 软件进行统计分析,用 Spearman 相关系数进行显著性 分析。采用 Origin Pro 2017 版本进行绘图。

累积系数代表了植物从土壤中吸收重金属到植物体的能力,也有研究称其为生物富集系数(Bioaccumulation factor, BAF)或生物浓缩系数(Bioconcentration factor, BCF)。转运系数(Translocation factor, TF) 代表了植物将重金属从根部转移到地上部分的能力, 可用于评估植物的重金属累积潜力^[2,23-25]。采用单因 子污染指数法计算土壤中重金属污染^[26]。

累积系数= $\frac{植物体内重金属含量}{土壤中重金属含量}$ 转运系数= $\frac{植物地上部分重金属含量}{植物地下部分重金属含量}$ 单因子污染指数法 $P_i = \frac{C_i}{s}$

式中: P_i 代表污染物单因子指数, C_i 为土壤实测含量, mg·kg⁻¹;S为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管 控标准(试行)》(GB15618—2018)中的风险筛选值 (表1)。 2020年5月

表1 农用地土壤汞、镉污染风险筛选值(mg·kg⁻¹)

| Table 1 | Soil mercury and cadmium pollution screening values i |
|---------|---|
| | agricultural land(mg•kg ⁻¹) |

| 污染项目 Pollution | 凤 | 风险筛选值 Pollution screening values | | | | | | |
|-------------------|--------|--|---|--------|--|--|--|--|
| projects | pH≤5.5 | 5.5 <ph≤6.5< td=""><td>6.5<ph≤7.5< td=""><td>pH>7.5</td></ph≤7.5<></td></ph≤6.5<> | 6.5 <ph≤7.5< td=""><td>pH>7.5</td></ph≤7.5<> | pH>7.5 | | | | |
| 汞 | 1.3 | 1.8 | 2.4 | 3.4 | | | | |
| 镉 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | | | | |

2 结果与讨论

2.1 苎麻种植区土壤汞、镉分布特征

本研究区土壤中的镉、汞含量分布情况如图2所示。研究区表层土壤中汞含量分布范围为0.381~ 9.040 mg·kg⁻¹,中间值为0.819 mg·kg⁻¹,变异系数为 1.165;镉含量分布范围为0.131~7.814 mg·kg⁻¹,中间 值为0.362 mg·kg⁻¹,变异系数为1.773,由变异系数可 知研究区土壤中汞、镉的空间分布差异大。根据《土 壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) (GB15618—2018)》中列出的汞、镉的风险管制值,计 算研究区土壤汞、镉污染情况,结果显示土壤中汞超 过风险管控值的样品数为10.87%,镉超过风险管控 值的样品数为67.39%。

2.2 苎麻对汞、镉的吸收累积特征

苎麻各部位的汞、镉含量分布如图3所示。从图 3(a)看出,根部汞含量分布范围为58.02~136.97 μg· kg⁻¹,中间值为86.02 μg·kg⁻¹;麻秆汞含量分布范围为 60.6~560.45 μg·kg⁻¹,中间值为99.60 μg·kg⁻¹;麻皮汞 含量分布范围为113.26~3 860.51 μg·kg⁻¹,中间值为 284.43 μg·kg⁻¹;麻叶汞含量分布范围为446.1~1 686.3 μg·kg⁻¹,中间值为886.63 μg·kg⁻¹。麻皮和麻叶中的 汞含量明显高于根部。文献报道,苎麻在汞污染土壤 中生长时,各部位汞含量表现为麻皮>麻叶>麻秆^[27]。 本研究结果与盆栽条件下苎麻的汞累积部位相近,这 表明麻皮和麻叶可能为苎麻对汞的主要储存部位。

从图 3(b)看出,根部镉含量分布范围为 10.1~ 1 527.8 μg·kg⁻¹,中间值为 98.35 μg·kg⁻¹;麻秆镉含量 分布范围为 7.17~1 203.63 μg·kg⁻¹,中间值为 154.67 μg·kg⁻¹;麻皮镉含量分布范围为 11.57~1 838.14 μg· kg⁻¹,中间值为 179.96 μg·kg⁻¹;麻叶镉含量分布范围 为 77.12~842.41 μg·kg⁻¹,中间值为 212.64 μg·kg⁻¹。 根部、麻秆、麻皮、麻叶中镉含量的范围十分接近。有 研究结果表明,镉对叶绿素存在低促高抑现 象^[10-12,16,28-29]。当土壤镉含量低于 5 mg·kg⁻¹时,会促





进苎麻根系及叶片生长,增强光合速率,但镉含量超 过25 mg·kg⁻¹时,镉会破坏叶绿体结构,抑制叶绿素 的生成,减低叶片中叶绿素含量,影响苎麻生长^[10]。 并且,只有土壤镉含量超过20 mg·kg⁻¹时,苎麻地上 部分镉含量才会出现达到饱和并开始下降的现象^[29]。 综合研究区的镉污染情况,该农田97%的土壤镉含 量均低于2 mg·kg⁻¹,苎麻受到的镉毒害较低,镉对苎 麻的根部及地上部均为促生作用。所以,镉较均匀分 布在苎麻各个部位。

为进一步分析汞和镉在苎麻各部位的转运分布 情况,本研究继续将苎麻各部位的汞、镉含量进行 Spearman相关性分析(图4)。从图4(a)看出,根部、 麻皮与麻秆中的汞含量呈显著正相关,但麻叶只与麻 皮存在显著正相关。根部、麻皮和麻秆是苎麻对汞的 吸收转运通道,所以具有显著正相关。麻叶代谢速度 快,生命周期短于茎和根¹¹⁶¹,所以不可能是长时间累 积导致汞含量偏高。此结果可能是麻叶在生长过程 中从苎麻体根部吸收转运累积的汞以及麻叶从大气 吸收和吸附汞的共同作用。从图4(b)看出,苎麻各 部位镉含量间都存在显著相关性,证明镉在苎麻体内 可能是通过单一且相同的通道进行体内运输并且未 受到根部累积生理防线的影响。

2.3 苎麻对汞、镉的累积转运特征

苎麻各部位对汞的累积系数、转运系数如图5所示。从图5(a)中可看出,根部对汞的累积系数范围为0.008~0.256,中间值为0.099;麻秆对汞的累积系数范围为0.017~0.805,中间值为0.113;麻皮对汞的累积系数范围为0.040~4.826,中间值为0.378;麻叶对汞的累积系数范围为0.040~4.826,中间值为0.378;麻叶对汞的累积系数范围为0.126~2.762,中间值为1.016。从图5(b)中可看出,麻秆对汞的转运系数范



图 3 汞和镉在苎麻各部位的分布情况(n=46)

Figure 3 Distribution of mercury and cadmium in different parts of ramie (n=46)





Figure 4 Correlation coefficient between mercury and cadmium contents in different parts of ramie

围为0.583~4.931,中间值为1.173;麻皮对汞的转运 系数范围为1.579~33.969,中间值为3.236;麻叶对汞 的转运系数范围为5.452~22.595,中间值为10.015。 麻叶对汞的累积系数明显高于根部、麻秆;苎麻地上 部对汞的转运系数分布为麻叶>麻皮>麻秆。韩少华 等¹⁷研究表明,在2 mg·kg⁻¹汞污染水平下,苎麻对汞 的累积系数范围为0.06~0.32,对汞的转移系数范围 为0.67~0.80。其研究与本文的汞污染程度相近,但 其累积系数范围较本研究略低,其转运系数远低于本 研究。唐贵才等¹⁰⁰通过研究苎麻在铅、镉复合污染条件下重金属的吸收累计特征,发现镉会促进苎麻对铅的吸收。所以,可能是土壤中的镉促进了苎麻对汞的吸收,提升了苎麻对汞的累积转运能力。

苎麻各部位对镉的累积系数、转运系数如图6所示。从图6(a)中可看出,根部对镉的累积系数范围为0.003~5.993,中间值为0.311;麻秆对镉的累积系数范围为0.011~3.592,中间值为0.383;麻皮对镉的累积系数范围为0.015~3.725,中间值为0.527;麻叶

对镉的累积系数范围为0.015~2.451,中间值为0.645。从图6(b)中可看出,麻秆对镉的转运系数范围为0.055~8.000,中间值为1.818;麻皮对镉的转运系数范围为0.089~10.830,中间值为2.255;麻叶对镉的转运系数范围为0.283~16.175,中间值为2.216。 苎麻各部位对镉的累积转运系数无明显差别。佘玮等^[31]在对矿区的苎麻进行调查发现,苎麻地上部对镉的累积系数范围为0.09~2.06,地下部对镉的累积系数范围为0.03~1.59,转运系数范围为0.69~3.00。对 比其研究结果,本研究区苎麻对镉的累积能力较低, 但转运能力较强。唐贵才等³⁰通过研究苎麻在铅、汞 复合污染条件下重金属的吸收累计特征,发现汞会抑 制苎麻对铅的吸收。所以,可能是土壤中汞抑制了苎 麻对镉的吸收,造成苎麻对镉的累积能力下降。

2.4 土壤 pH、DOC 对苎麻吸收汞、镉的影响

本研究区为农田区域,定期定量施加氮、磷、钾等 复合肥,各地块营养元素含量相近。土壤pH是土壤 重要的理化性质之一,土壤pH的变化不仅会影响土



图5 苎麻各部位对汞的累积、转运系数(n=46)

Figure 5 The BAF and TF of mercury in different parts of ramie (n=46)



图6 苎麻各部位对镉的累积、转运系数(n=46)

Figure 6 The BAF and TF of cadmium in different parts of ramie (n=46)

农业环境科学学报 第39卷第5期

壤肥力及养分,还会影响土壤中重金属的有效性及迁移转化过程^[32];溶解性有机碳(DOC)不仅对土壤营养 元素(如碳、氮、磷)和污染物的化学活性与生物活性 有直接的影响,还是许多无机污染物的主要迁移载 体,同样影响了重金属迁移转化^[22]。所以,分析土壤 pH、DOC对苎麻吸收转运汞、镉的影响将有助于解释 苎麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征。

本研究将 pH 值及土壤的溶解性有机碳含量与苎麻不同部位的汞、镉含量进行 Spearman 相关性分析(表2)。土壤 DOC 与麻秆、麻皮中的汞含量呈现显著负相关,表明土壤中的 DOC 含量上升会导致苎麻麻秆、麻皮中汞含量的下降。土壤 pH 与麻秆、麻皮中的 镉含量呈显著负相关,可能是酸性土壤环境会使得土壤中交换态的镉含量增加^[14],进而促进苎麻的麻秆、麻皮两个部位对镉的吸收储存。

为了进一步解释上述结果,对土壤汞含量、镉含 量、土壤pH和DOC之间进行Spearman相关性分析, 结果如表3所示。本研究中,研究区pH范围为4.71~ 7.27,在该区间内汞的迁移性较强,利于汞-土壤解吸 行为的发生,且汞-甲基化过程会受到一定程度抑 制^[32]。土壤DOC含量升高导致的土壤pH下降,这可 能是土壤腐殖化形成的有机酸为土壤提供了氢离子 造成的。土壤氢离子的增加,首先会导致土壤中汞的 氢氧化物形态减少,土壤胶体对氢氧化物态汞的吸附 量减少,其次还会加强氢离子竞争汞离子吸附点位的 能力,降低有机质-汞络合物的稳定性,增强汞在土 壤中的迁移能力^[32]。但在本pH范围内,pH的下降还 会导致土壤Eh的升高,与土壤中的S²⁻形成HgS^[32],使 得土壤中的汞难以被苎麻吸收。所以,土壤DOC含 量越高,一方面会使土壤中汞的迁移能力增强,但也 有可能会致使汞的生物有效性降低。

有研究表明,当土壤的镉浓度高于10 mg·kg⁻¹ 时,DOC对土壤中镉的吸附解吸影响将显著强于镉 浓度低于10 mg·kg⁻¹时的土壤^[22]。本研究区97%的土 壤镉含量均低于2 mg·kg⁻¹,DOC对镉的吸附能力相 对较弱。所以,Spearman相关性分析会出现土壤 DOC与镉含量之间不存在显著相关性的结果。

3 结论

(1) 苎麻的麻皮、麻叶中的汞含量显著高于根部; 根部、麻秆、麻皮与麻叶中的镉含量十分接近。

(2) 苎麻麻叶对汞的累积系数明显高于根部、麻 秆; 苎麻地上部对汞的转运系数分布为麻叶>麻皮> 麻秆。苎麻各部位对镉的累积转运系数无明显差别。

(3)土壤中的DOC含量上升会导致苎麻麻秆、麻 皮中汞含量的下降,土壤pH的下降会促进苎麻的麻 秆、麻皮两个部位对镉的吸收储存。

参考文献:

[1] 卢光华, 岳昌盛, 彭 犇, 等. 汞污染土壤修复技术的研究进展[J]. 工程科学学报, 2017, 39(1):1-12.

LU Guang-hua, YUE Chang-sheng, PENG Ben, et al. Review of research progress on the remediation technology of mercury contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(1):1-12.

[2] Chen B, Tan S, Zeng Q, et al. Soil nutrient heterogeneity affects the ac-

| 表2 土壤 pH、DOC 与苎麻各部位汞、镉含量的相关性(n=4 | 1 6) |
|----------------------------------|-----------------|
|----------------------------------|-----------------|

Table 2 Correlation between soil characteristics and mercury and cadmium contents in various parts of ramie (n=46)

| 土壤 Soil | 苎麻汞含量 Content of Hg in various parts of ramie | | | | 苎麻镉含量 Content of Cd in various parts of ramie | | | |
|------------|---|---------|----------|-----------|---|----------|----------|----------|
| | 根部Root | 麻秆Stem | 麻皮 Skin | 麻叶 Leaves | 根部Root | 麻秆Stem | 麻皮 Skin | 麻叶Leaves |
| pH | -0.274 | 0.078 | 0.217 | 0.031 | -0.169 | -0.476** | -0.446** | -0.216 |
| DOC | -0.044 | -0.297* | -0.398** | -0.131 | 0.081 | 0.185 | 0.212 | 0.039 |

注:*在0.05级别(双尾)相关性显著;**在0.01级别(双尾)相关性显著。下同。

Note: *At 0.05 level(double tail), the correlation was significant; **At 0.01 level(double tail), the correlation was significant. The same below.

表3 研究区 pH、DOC 与土壤汞、镉含量及相互间的相关性(n=46)

Table 3 pH, DOC, Hg and Cd contents in soil and their correlation in the study area(n=46)

| 土壤 Soil | 最小值 最大值 | | 平均值(±标准差) | 变异系数 | Spearman 相关系数 Correlation coefficient of Spearman | | | |
|------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|---|----------|------------------------|------------------------|
| | Minimal value | Maximal value | l Mean(±standard deviation) | Coefficient of variation | рН | DOC | 土壤汞含量 content of Hg | 土壤镉含量 content of Cd |
| рН | 4.71 | 7.27 | 6.12±0.64 | 0.104 | — | -0.586** | 0.187 | -0.078 |
| DOC/mg·L ⁻¹ | 17.20 | 130.00 | 64.02±25.25 | 0.394 | -0.586** | — | -0.343* | 0.085 |

cumulation and transfer of cadmium in bermuda grass (*Cynodon dacty-lon*(L.) pers.)[J]. *Chemosphere*, 2019, 221;342–348.

[3] 周曾艳,唐帮成,徐路,等.铜仁汞矿区土壤汞污染现状调查研究[J].环境保护科学,2016,42(4):52-55.

ZHOU Zeng-yan, TANG Bang-cheng, XU Lu, et al. Investigation of soil mercury pollution in the mercury mining areas of Tongren City[J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(4):52-55.

- [4] 夏吉成,胡 平,王建旭,等.贵州省铜仁汞矿区汞污染特征研究
 [J].生态毒理学报,2016,11(1):231-238.
 XIA Ji-cheng, HU Ping, WANG Jian-xu, et al. Mercury pollution characteristics in Tongren mercury mining area, Guizhou Province, China
 [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(1):231-238.
- [5] 李榜江,李 萍.茶皂素作用下苎麻对镉污染土壤的修复效应[J]. 中国水土保持, 2017(3): 34-37, 69.

LI Bang-jiang, LI Ping. Effects of boehmeria nivea to the remediation of chromium contaminated soil under the tea sapogenin effect[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2017(3):34–37, 69.

- [6] 孙士涛, 郭 兵, 余永廷, 等. 外源物质在苎麻修复镉污染土壤中的应用研究进展[J]. 中国麻业科学, 2018, 40(5):239-243.
 SUN Shi-tao, GUO Bing, YU Yong-ting, et al. Research development in application of exogenous materials in remediation of cadmium contaminated soil by ramie[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2018, 40(5): 239-243.
- [7] 韩少华.几种植物对 Hg、Cd 污染农田土壤修复效果的比较研究 [D].上海:东华大学,2012.

HAN Shao-hua. A comparative study on removal performance of Hg and Cd in agriculture soils for several plants[D]. Shanghai: Donghua University, 2012.

 [8] 龙育堂, 刘世凡, 熊建平, 等. 苎麻对稻田土壤汞净化效果研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(1): 30-33.
 LONG Yu-tang, LIU Shi-fan, XIONG Jian-ping, et al. Study on the

purification effect of ramie on soil mercury in paddy soil[J]. *Agro-envin-nmental Protection*, 1994, 13(1):30–33.

[9] 曹 诣, 佘 玮, 孙敬钊, 等. 苎麻修复重金属污染土壤研究现状 [J]. 作物研究, 2014, 28(6):775-779.

CAO Yi, SHE Wei, SUN Jing-zhao, et al. Research status of resistance to heavy metal population of ramie[J]. *Crop Research*, 2014, 28(6): 775–779.

[10] 李雪玲, 佘 玮, 李林林, 等. 镉对3个苎麻品种生长和光合特性的影响[J]. 中国麻业科学, 2017, 39(3):130-135.

LI Xue-ling, SHE Wei, LI Lin-lin, et al. Effects of cadmium on growth and photosynthetic characteristics of three ramie cultivars[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2017, 39(3):130–135.

[11] 李玉兰. 苎麻(Boehmeria nivea L.)高累积镉种质筛选及耐镉相关 生理指标研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.

LI Yu-lan. Screening of high Cd accumulation germplasms and physiological analysis of Cd tolerance in ramie (*Boehmeria nivea* L.)[D]. Beijing : Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.

[12] 李玉兰, 陈坤梅, 喻春明, 等. 镉胁迫下苎麻生理生化变化规律及品种间差异比较[J]. 中国麻业科学, 2017, 39(3):105-110.
 LI Yu-lan, CHEN Kun-mei, YU Chun-ming, et al. Physiological and

biochemical dynamic characteristics of ramie (*Boehmeria nivea* L.) to cadmium stress and comparison among various varieties[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2017, 39(3):105–110.

[13] 刘 金. 镉、铅污染土壤的苎麻—化学联合修复[D]. 杨凌:西北农 林科技大学, 2015.

LIU Jin. The ramie-chemical combined remediation of Cd/Pb contamination soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.

- [14] 佘 玮. 苎麻对重金属吸收和积累特征及镉胁迫响应基因表达研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2010.
 SHE Wei. The uptake and accumulation characteristics of heavy metals and expression of Cd stress response genes in ramie (*Boehmeria nivea* L.)[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [15] 赵丹博,曹 诣,佘 玮,等.镉、砷复合污染对苎麻生长及吸收 镉、砷的影响[J]. 中国麻业科学, 2015, 37(4):183-188.
 ZHAO Dan-bo, CAO Yi, SHE Wei, et al. Effects of Cd, As stress on growth and Cd, As uptake of ramie (*Boehmeria nivea* L.)[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2015, 37(4):183-188.
- [16] 朱守晶, 史文娟, 揭雨成. 不同苎麻品种对土壤中镉、铅累积的差异[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(2):320-326.
 ZHU Shou-jing, SHI Wen-juan, JIE Yu-cheng. Variety difference in cadmium and lead accumulation by ramie(*Boehmeria nivea*) from soil [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2018, 34(2):320-326.
- [17] 庄胜利. 汞污染农田土壤强化植物修复的初步研究[D]. 上海:上海师范大学, 2018.

ZHUANG Sheng-li. Preliminary study on enhanced phytoremediation of Hg contaminated farmland soil[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.

[18] 湛天丽,黄 阳,何腾兵,等.贵州铜仁汞矿区主要农产品重金属 污染及其健康风险评估[J].安全与环境学报,2017,17(4):1524-1529.

ZHAN Tian-li, HUANG Yang, HE Teng-bing, et al. Heavy metal pollution and health risk in major agricultural products in Tongren mercury mine area, Guizhou[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4):1524–1529.

[19] 孙巧玲, 苟光前, 陈云飞, 等. 铜仁市万山特区木本植物区系研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(6):873-878.

SUN Qiao-ling, GOU Guang-qian, CHEN Yun-fei, et al. Study on the woody plants flora of Wanshan, Tongren City[J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(6):873-878.

- [20] 李雅贞,罗 琳,张 琪,等. 苎麻对重金属复合污染土壤的修复效率研究[J]. 湖南农业科学, 2014(17):38-41. LI Ya-zhen, LUO Lin, ZHANG Qi, et al. Composite contaminated soil arsenic concentrations effect on ramie's growth and absorption and accumulation characteristics of arsenic, lead and zinc[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(17):38-41.
- [21] 佘 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 不同程度污染农田苎麻吸收积累镉 特性研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(14):275-279.

SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Cd uptake and accumulation of ramie planting in contaminated soil in Anhua and Zhuzhou of Hunan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(14):275–279. [22] 郑永红. 煤矸石风化物-土壤系统中溶解性有机碳对镉吸附解吸 特征及机制研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017. ZHENG Yong-hong. Research on the characteristic and mechanism

of cadmium adsorption – desorption by dissolved organic carbon in coal gangue weathering matter-soil system[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.

- [23] Ghavri S V, Singh R P. Phytotranslocation of Fe by biodiesel plant Jatropha curcas L. grown on iron rich wasteland soil[J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2010, 22:235–243.
- [24] Napoli M, Cecchi S, Grassi C, et al. Phytoextraction of copper from a contaminated soil using arable and vegetable crops[J]. *Chemosphere*, 2019, 219:122-129.
- [25] Rebhi A E M, Lounici H, Lahrech M B, et al. Response of Artemisia herba alba to hexavalent chromium pollution under arid and semi-arid conditions[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21: 224-229.
- [26] 杨 姝, 贾 乐, 毕玉芬, 等. 7种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤
 镉铅的累积特征及品种差异[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35
 (3):222-228.

YANG Shu, JIA Le, BI Yu-fen, et al. Interspecific differences and accumulative characteristics of cadmium and lead about seven alfalfa (*Medicago Sativa* L.)cultivars in a lead-zinc mine of Yunnan, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(3): 222-228.

[27] 刘小平, 高润霞, 吕发生, 等. 小白菜间作对苎麻地上部分汞吸收 累积的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(24):29-33.

LIU Xiao-ping, GAO Run-xia, LÜ Fa-sheng, et al. Effect of pakchoi intercropping on Hg absorption and accumulation in ramie overground part[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(24): 29-33

[28] 杨叶萍, 简敏菲, 余厚平, 等. 镉胁迫对苎麻(Boehmeria nivea)根系 及叶片抗氧化系统的影响[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(4): 184– 193.

YANG Ye-ping, JIAN Min-fei, YU Hou-ping, et al. Influence on the antioxidant system in roots and leaves of *Boehmeria nivea* under different cadmium stress[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(4): 184–193.

[29] 王 欣. 苎麻镉耐性机制及应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011. WANG Xin. Study on cadmium resistance mechanism of ramie and its application[D]. Changsha: Hunan University, 2011.

[30] 唐贵才,董 伟. 苎麻生长初期对重金属铅镉汞的迁移累积特征
[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(1):171-174, 178.
TANG Gui-cai, DONG Wei. Migration and accumulation characteristics of plumbum, cadmium and mercury in the early growth stage of *Boehmeria nivea*[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43(1):171-174, 178.

- [31] 佘 玮,揭雨成,邢虎成,等.湖南冷水江锑矿区苎麻对重金属的吸收和累积特性[J].农业环境科学学报,2010,29(1):91-96. SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Uptake and accumulation of heavy metal by ramie(*Boehmeria nivea*) growing on antimony mining area in Lengshuijiang City of Hunan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):91-96.
- [32] 窦韦强, 安 毅, 秦 莉, 等. 土壤 pH 对汞迁移转化的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1):1-8.
 DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, et al. Research progress on effects of soil pH on migration and transformation of mercury[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1):1-8.