

富里酸促进印度芥菜-棉花轮作对汞污染农田土壤修复的研究

范占煌¹, 孙佳峰², 陆永明³, 孙达³, 徐灿灿^{2*}, 刘锐² (1. 中节能大地(杭州)环境修复有限公司, 浙江杭州 310020; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 浙江嘉兴 314006; 3. 嘉兴市南湖区农业经济局, 浙江嘉兴 314001)

摘要 [目的]提高汞污染农田土壤的修复效率。[方法]在汞污染农田土壤中投加富里酸(投加量为0、0.075、0.150、0.225 kg/m²),并在试验结束后分析植物生物量和组织内汞含量及土壤总汞、有效汞含量,研究富里酸促进印度芥菜-棉花轮作对土壤汞的修复效果。[结果]投加富里酸可促进印度芥菜、棉花植株生长,但差异不显著,投加富里酸能提高印度芥菜、棉花中总汞的含量,促进印度芥菜、棉花根部汞向地上部分转运以及土壤总汞和有效汞的降低。每个种植季都投加富里酸,且富里酸投加量为0.075 kg/m²促进效果最好,修复后,土壤总汞含量由(0.56±0.05)mg/kg降低至(0.32±0.04)mg/kg,土壤有效汞含量由(2.13±0.04)μg/kg降低至(0.48±0.05)μg/kg。[结论]投加富里酸可作为促进印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤的潜在修复技术。

关键词 汞污染农田土壤;富里酸;印度芥菜;棉花;轮作;修复

中图分类号 X53 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)07-0085-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.07.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Promotion of Fulvic Acid on the Remediation of Mercury Contaminated Farmland Soil by *Brassica juncea*-Cotton Rotation

FAN Zhan-huang¹, SUN Jia-feng², LU Yong-ming³ et al (1. Cecep Dadi (Hangzhou) Environmental Remediation Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310020; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing, Zhejiang 314006; 3. Agricultural Economic Bureau of Nanhu District, Jiaxing City, Jiaxing, Zhejiang 314001)

Abstract [Objective] In order to improve the remediation efficiency of mercury contaminated farmland soil. [Method] Fulvic acid (dosage: 0, 0.075, 0.150, 0.225 kg/m²) was added to the mercury contaminated farmland soil. After the experiment, the plant biomass, the mercury content in the tissue, the total mercury and the effective mercury content in the soil were analyzed, and the enrichment of mercury in *Brassica juncea*-cotton rotation were studied. [Result] The addition of fulvic acid had no significant effect on the biomass of *Brassica juncea* and cotton plants, but could increase the content of total mercury in plants, promote the transport of mercury from plant roots to aboveground parts and reduce the total and effective mercury in soil. When the fulvic acid dosage was 0.075 kg/m², and each planting season was added with fulvic acid, the promotion effect was the best. After restoration, the total mercury content of soil decreased from (0.56±0.05) mg/kg to (0.32±0.04) mg/kg, and the effective mercury content of soil decreased from (2.13±0.04) μg/kg to (0.48±0.05) μg/kg. [Conclusion] The addition of fulvic acid can be used as a potential remediation technology to promote the remediation of mercury contaminated farmland soil by *Brassica juncea*-cotton rotation.

Key words Mercury contaminated farmland soil; Fulvic acid; *Brassica juncea*; Cotton; Rotation; Remediation

2014年生态环境部公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤环境状况总体不容乐观,耕地土壤环境质量堪忧。全国土壤总的点位超标率为16.1%,以无机类型污染为主,汞污染点位超标率达1.6%^[1]。汞是一种人体非必需的重金属元素,汞及其化合物是具有很强的致癌致畸作用、神经毒性持久性、遗传毒性和生物积累效应的最危险的环境污染物之一^[2-4],由于其危害巨大,汞被国际卫生组织列为优先控制污染物^[5]。我国在1980—2012年汞的排放量大增,被认为是最大的汞排放国^[6]。而排放的汞又会通过大气沉降、固废堆积等方式污染土壤。土壤中的汞又可以通过食物链在人体中富集,所以受汞污染的土壤被认为是全球环境和人类健康风险的主要来源之一^[7]。土壤汞污染的治理迫在眉睫。

植物修复属于安全、成本低、环境友好型的重金属污染治理措施^[8-9],适合中、低浓度污染土壤的治理。目前,通常采用的植物修复技术主要分2类^[10]:一类是采用超富集植物修复重金属污染土壤,但是截至目前,尚无研究发现汞的超

富集植物;另一类是采用不具备超富集重金属而生物量大的植物修复污染的土壤。印度芥菜具有大量积累多种重金属能力^[11];棉花生物量大,对多种重金属有较强的富集能力,是常见的重要经济作物^[12]。这2种作物在一年中可以分不同的种植季种植。轮作作为传统的种植模式之一,可以有效提高土地利用率和生产效率^[13]。目前利用作物轮作方式修复土壤重金属主要研究集中在镉^[13-14],而对汞的研究相对较少。此外,土壤中大部分汞都是以惰性形态存在的,生物可利用态汞的含量普遍偏低^[15-16]。因此,植物修复汞污染的土壤,需提高土壤中汞的生物有效性,从而提高植物修复的效率。

腐殖酸普遍存在于环境中,其对土壤中汞的环境迁移活性兼具抑制与活化的双重效应,其中有文献报道富里酸可表现出显著的促进效应^[16]。因此,富里酸可作为植物吸收汞的促进剂。该研究以印度芥菜、棉花为修复植物,采用印度芥菜-棉花轮作种植模式,探究在大田环境下,添加富里酸对轮作模式下植物富集农田土壤汞的影响以及土壤汞有效态的变化特征,以期为汞污染农田土壤的强化植物修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计 田间试验位于嘉兴市南湖区某农田(原种

基金项目 浙江省农业农村厅项目(2017330401000007)。

作者简介 范占煌(1980—),男,福建永定人,高级工程师,硕士,从事环境污染修复技术研究。*通信作者,高级工程师,硕士,从事环境污染修复技术研究。

收稿日期 2020-07-11

植模式为稻麦轮作),在小型热电厂附近。试验田土壤基本理化性质为有机质含量 38.2 g/kg、全氮含量 2.5 g/kg、全磷含量 0.8 g/kg、水解性氮含量 175.1 mg/kg、有效磷含量 20.9 mg/kg、速效钾含量 139.6 mg/kg、阳离子交换量 20.2 cmol(+)/kg、土壤总汞含量 0.56 mg/kg、有效汞含量 2.13 μg/kg、土壤 pH 6.3。土壤总汞含量超过我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值。

按单独印度芥菜,富里酸投加量分别为 0、0.075、0.150、0.225 kg/m² 进行处理,设置小区,除富里酸投加量 0.075 kg/m² 处理设置 6 个重复外,其他每个处理 3 个重复,小区随机排列,共 15 个小区,每个试验小区面积为 3.0 m×11.1 m。印度芥菜先播种,经过 40 d 生长后,移栽到各小区,每个小区移栽量为 300 株。在移栽前,按小区各自设定撒入富里酸,撒入后进行人工翻土 20 cm 左右,然后移栽印度芥菜,浇水,移栽后,对试验农田定期浇水并进行统一管理。移栽后,植物生长期为 6 个月。

印度芥菜连根收获后,在原先种植印度芥菜的小区上,种植棉花。种植印度芥菜时富里酸投加量为 0.075 kg/m² 的 6 个重复小区,随机选取 3 个小区不再投加富里酸外,其余处理的小区均延续印度芥菜时的处理,棉花播种量为每个小区 100 株。在播种前,按试验设置撒入富里酸,撒入后进行翻土,翻土深度为 20 cm 左右,然后进行播种,浇水,后期对试验农田定期浇水并进行统一管理。棉花生长期为 6 个月。

种植棉花后,实际处理方式:印度芥菜-棉花轮作(对照,不加富里酸),1 年之中仅在种植印度芥菜时投加 1 次 0.075 kg/m² 富里酸,种植棉花时不加(记为 1 年投 1 次);印度芥菜-棉花轮作+0.075 kg/m² 富里酸,种植印度芥菜、棉花时都投加 0.075 kg/m² 富里酸(记为 1 年投 2 次);印度芥菜-棉花轮作+0.150 kg/m² 富里酸,种植印度芥菜、棉花时富里酸都投加;印度芥菜-棉花轮作+0.225 kg/m² 富里酸,种植印度芥菜、棉花时富里酸都投加。

1.2 样品采集与分析 印度芥菜、棉花收获时,在每个小区采用 5 点采样法采集 5 穴植物样(连根)。同时,在采集每穴植物样时收集该穴植物根部的土壤,5 穴土样混合均匀后采用四分法分样,每小区最后获得 1 kg 新鲜土壤样品。将土壤样品置于密封样品袋中带回试验室,自然风干后过 100 目筛。

每个小区先采的 5 穴植物样,采集棉花时每个小区先采完棉絮,余下的连根整株植物带回实验室,采集印度芥菜时整株植物连根带回实验室,棉花、印度芥菜植株用自来水反复冲洗干净在烘箱中 50 ℃烘干,各自捆成一捆,每个小区内剩余的植株同样进行以上操作,然后和先采集的 5 穴植株一起,每个小区整株植物称重,植物干重(kg)除以小区面积(33.3 m²)即为每个小区植株的生物量(kg/m²)。称重后,每个小区采集的 5 穴植株,分根部和地上部分,经植物粉碎机粉碎后待测总汞^[4],采集的棉絮也单独进行总汞测试。

土壤基本理化性质测定将采用常规分析法^[7]。土壤有

机质测定采用容量法;全氮测定采用开氏法;pH 测定采用电位法,土水比例确定为 1:2.5;阳离子交换量测定采用醋酸铵浸提火焰分光光度计;速效磷测定采用 NH₄F-HCl 法;速效钾测定采用醋酸铵-火焰光度计法。总汞测定采用原子荧光谱仪(科创海光 AFS-9700)^[7],土壤有效汞用 0.1 mol/L 盐酸浸提后再测定^[17]。

1.3 数据分析 采用 SPSS 24.0 软件对试验数据进行显著性分析,其中投加富里酸小区与对照组的差异性分析, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 印度芥菜-棉花轮作植株生物量 从表 1 可以看出,富里酸投加量为 0.075、0.150、0.225 kg/m² 的小区印度芥菜植株生物量均比对照有所增加,但差异均不显著。随着富里酸投加量的增加,印度芥菜植株生物量逐渐增加,表明投加量为 0.075~0.225 kg/m² 的富里酸能促进印度芥菜生长,但不显著。

印度芥菜收获后,轮作棉花。富里酸投加量为 0.075、0.150、0.225 kg/m² 的小区棉花植株生物量均比对照有所增加,但差异均不显著。随着富里酸投加量的增加,棉花植株生物量逐渐增加,表明投加量为 0.075~0.225 kg/m² 的富里酸能促进棉花生长,但不显著。

在印度芥菜种植时,一次投入 0.075 kg/m² 富里酸的小区,印度芥菜收获后,直接种植棉花,也即印度芥菜-棉花轮作,1 年 1 次投入 0.075 kg/m² 富里酸,棉花生物量为(0.80±0.09)kg/m²,比单种棉花的小区植株生物量有所增加,但差异不显著,比每个种植季都投加即 1 年投 2 次 0.075 kg/m² 富里酸棉花生物量(0.82±0.08 kg/m²)的低,但差异不显著。

表 1 不同处理下印度芥菜、棉花植物生物量情况

Table 1 The biomass of *Brassica juncea* and cotton under different treatments kg/m²

序号 No.	处理 Treatment	生物量 Biomass
1	印度芥菜	0.57±0.10
2	印度芥菜+0.075 kg/m ² 富里酸	0.59±0.09
3	印度芥菜+0.150 kg/m ² 富里酸	0.63±0.05
4	印度芥菜+0.225 kg/m ² 富里酸	0.65±0.05
5	棉花	0.79±0.08
6	棉花+0.075 kg/m ² 富里酸	0.82±0.08
7	棉花+0.150 kg/m ² 富里酸	0.83±0.08
8	棉花+0.225 kg/m ² 富里酸	0.86±0.07

2.2 印度芥菜-棉花轮作植株对汞的富集 由表 2 可见,对照处理的印度芥菜根部、地上部分总汞含量分别是(0.021±0.004)mg/kg、未检出,表明不加富里酸,印度芥菜对汞的富集量较低,且富集在植株根部。富里酸投加量为 0.075、0.150、0.225 kg/m² 的小区,印度芥菜根部总汞含量逐渐增高,且投加量为 0.150、0.225 kg/m² 的小区均极显著高于对照。投加富里酸,印度芥菜地上部分开始有总汞富集,且随着投加量的增加,印度芥菜地上部分总汞含量逐渐降低。以

上结果表明,与不加富里酸的对照相比,投加富里酸能促进印度芥菜对土壤汞的吸收,且促进根系部分的汞向地上部分转运,而低投加的富里酸促进效果更好。总体而言,富里酸可促进土壤汞在印度芥菜中富集。

印度芥菜收获后,轮作棉花,对照处理的棉花根部、地上部分总汞含量分别是(0.016±0.003)mg/kg、未检出,表明不加富里酸,棉花对汞的富集量较低,且富集在植株根部。富里酸投加量为0.075、0.150、0.225 kg/m²的小区,棉花根部总汞含量逐渐增高,投加量为0.225 kg/m²的小区显著高于对照。与种植印度芥菜一样,投加富里酸,轮作棉花地上部分开始有总汞富集,且随着投加量的增加,棉花地上部分总汞含量逐渐降低。以上结果表明,与不加富里酸的对照相比,投加富里酸能促进棉花对土壤汞的吸收,且促进根系部分的汞向地上部分转运,而低投加的富里酸促进效果较好。总体而言,富里酸可促进土壤汞在棉花中富集。

在印度芥菜种植时,一次投入0.075 kg/m²富里酸的小区,印度芥菜收获后,直接种植棉花,也即印度芥菜-棉花轮作,1年1次投入0.075 kg/m²富里酸,棉花植株根部、地上部分总汞含量分别为(0.022±0.006)、(0.015±0.004)mg/kg。与印度芥菜-棉花轮作,种植印度芥菜、棉花都投入0.075 kg/m²富里酸,即1年投2次富里酸,棉花植株根部、地上部分总汞含量分别为(0.018±0.004)、(0.045±0.003)mg/kg;1年投1次小区,棉花根部总汞与1年投2次的小区相比没有显著差异,但是地上部分与1年投2次的小区相比极显著降低。表明印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤,富里酸1年投2次比1年投1次促进植物富集总汞效果更好。

对所有小区进行棉絮总汞检测,结果显示总汞含量为未检出,表明棉絮中没有汞的积累。由此棉花植株中其他部分富集汞,而可利用部分的棉絮没有富集汞,有利于利用印度芥菜-棉花轮作实现边生产边修复土壤汞的目的。

表2 不同处理的印度芥菜、棉花植物根部、地上部分总汞含量
Table 2 Total mercury content of *Brassica juncea* and cotton roots, aboveground plant parts under different treatments mg/kg

序号 No.	处理 Treatment	根 Root	地上部分 Abovegro- und part
1	印度芥菜	0.021±0.004	未检出
2	印度芥菜+0.075 kg/m ² 富里酸	0.026±0.005	0.032±0.004
3	印度芥菜+0.150 kg/m ² 富里酸	0.035±0.004 ^{**}	0.026±0.005
4	印度芥菜+0.225 kg/m ² 富里酸	0.043±0.005 ^{**}	0.018±0.005
5	棉花	0.016±0.003	未检出
6	棉花+0.075 kg/m ² 富里酸	0.018±0.004	0.045±0.003
7	棉花+0.150 kg/m ² 富里酸	0.021±0.007	0.024±0.003
8	棉花+0.225 kg/m ² 富里酸	0.025±0.004 [*]	0.021±0.004

注: * 表示差异显著($P<0.05$), * * 表示差异极显著($P<0.01$)
Note: * means significant difference ($P<0.05$), * * means extremely significant difference ($P<0.01$)

2.3 土壤中总汞、有效汞含量 由表3可见,印度芥菜修复后,与修复前土壤中总汞含量(0.56±0.05 mg/kg)相比,对照小区土壤中总汞含量为(0.53±0.04)mg/kg,略有降低,但差

异不显著。3种投加量富里酸处理小区土壤中总汞含量除了投加量为0.225 kg/m²的小区外均显著低于对照。可见,投加富里酸有利于印度芥菜对土壤中汞的吸收以及土壤中总汞的降低。投加量为0.075~0.225 kg/m²,随着富里酸投加量的增加,土壤中总汞含量的降低量减少,表明低投加量的富里酸更有利于促进印度芥菜对土壤总汞的修复。

印度芥菜修复后,与修复前土壤中有效汞含量(2.13±0.04 μg/kg)相比,对照小区土壤中有效汞含量显著降低,为(1.39±0.07)μg/kg,表明印度芥菜本身能吸收一定量的有效汞。3种投加量富里酸处理小区土壤中有效汞含量均显著低于对照和修复前,可见投加富里酸不仅能使土壤中总汞降低,也能促进印度芥菜对土壤中有效汞的吸收。投加量为0.075~0.225 kg/m²,随着富里酸投加量的增加,这种促进作用减弱,低投加量的富里酸促进效果更好。投加富里酸,土壤中有效汞降低的趋势与土壤中总汞的降低趋势相同。

印度芥菜收获后,轮作棉花,单种棉花小区,土壤中总汞含量为(0.49±0.04)mg/kg,比单种植印度芥菜收获后,土壤中总汞又有降低,但差异不显著。3种投加量富里酸处理小区土壤中总汞含量除了投加量为0.075 kg/m²的小区土壤中总汞显著低于对照外,其余的与对照相比差异不显著。与种植印度芥菜相比,轮作棉花后,土壤中总汞含量继续降低,其中富里酸投加量为0.075 kg/m²的小区有显著降低,其余小区差异不显著。

印度芥菜-棉花轮作,单种棉花小区,土壤中有效汞含量为(0.76±0.07)μg/kg,比单种植印度芥菜收获后,土壤中有效汞又有降低,差异显著。3种投加量富里酸处理小区土壤中有效汞含量均显著低于对照。与种植印度芥菜相比,轮作棉花后,土壤中有效汞含量继续降低,且差异均显著。

表3 不同处理的印度芥菜、棉花土壤中总汞、有效汞含量
Table 3 The content of total mercury and available mercury in *Brassica juncea* and cotton soils with different treatments

序号 No.	处理 Treatment	土壤总汞 Total mercury in soil mg/kg	土壤有效汞 Effective mercury in soil//μg/kg
1	印度芥菜	0.53±0.04	1.39±0.07
2	印度芥菜+0.075 kg/m ² 富里酸	0.42±0.06 ^{**}	1.05±0.08 ^{**}
3	印度芥菜+0.150 kg/m ² 富里酸	0.46±0.05 [*]	1.12±0.06 [*]
4	印度芥菜+0.225 kg/m ² 富里酸	0.48±0.04	1.15±0.07 [*]
5	棉花	0.49±0.04	0.76±0.07
6	棉花+0.075 kg/m ² 富里酸	0.32±0.04 ^{**}	0.48±0.05 ^{**}
7	棉花+0.150 kg/m ² 富里酸	0.39±0.03	0.59±0.05 [*]
8	棉花+0.225 kg/m ² 富里酸	0.41±0.03	0.65±0.06 [*]

注: * 表示差异显著($P<0.05$), * * 表示差异极显著($P<0.01$)
Note: * means significant difference ($P<0.05$), * * means extremely significant difference ($P<0.01$)

以上结果表明,投加富里酸有利于印度芥菜-棉花轮作对土壤汞的吸收以及土壤总汞、有效汞的降低,且低投加量的富里酸更有利于促进印度芥菜-棉花轮作对土壤汞的修复,尤其是富里酸投加量为0.075 kg/m²,棉花收获后,土壤中总汞、有效汞含量比印度芥菜收获后进一步显著降低。

印度芥菜-棉花轮作, 0.075 kg/m^2 富里酸 1 年投 1 次, 棉花收获后, 土壤中总汞、有效汞含量分别为 $(0.43 \pm 0.03) \text{ mg/kg}$ 、 $(0.75 \pm 0.05) \mu\text{g/kg}$, 均显著低于富里酸 1 年投 2 次棉花收获后土壤中总汞 $(0.32 \pm 0.04 \text{ mg/kg})$ 、有效汞 $(0.48 \pm 0.05 \mu\text{g/kg})$ 含量。表明富里酸 1 年投 2 次更有利于促进印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤。

该研究中, 从修复效果及经济性考虑, 投加量为 0.075 kg/m^2 的富里酸更适合用于印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤。印度芥菜、棉花地上部分生物量大于根部, 所以促进印度芥菜、棉花植株对汞的富集, 尤其是植株根部汞向地上部分转运, 对于印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤更具现实意义。

3 结论与讨论

为了提高汞污染农田土壤的修复效率, 该试验在汞污染农田土壤中投加富里酸, 研究印度芥菜-棉花轮作对汞的富集情况。结果表明, 与只种印度芥菜、棉花不加富里酸的对照小区相比, 投加 $0.075 \sim 0.225 \text{ kg/m}^2$ 富里酸, 随着投加量增加, 印度芥菜、棉花生物量逐渐增加, 但差异不显著。投加富里酸能促进印度芥菜-棉花轮作对土壤汞的吸收, 且促进印度芥菜、棉花根部汞向地上部分转运。随着富里酸投加量的增加, 印度芥菜、棉花植株根部总汞富集量增加, 地上部分总汞富集量减少。低投加量的富里酸更有利于促进印度芥菜-棉花轮作对土壤总汞的吸收, 富里酸投加量为 0.075 kg/m^2 , 修复后土壤总汞含量由 $(0.56 \pm 0.05) \text{ mg/kg}$ 降低至 $(0.32 \pm 0.04) \text{ mg/kg}$, 土壤有效汞含量由 $(2.13 \pm 0.04) \mu\text{g/kg}$ 降低至 $(0.48 \pm 0.05) \mu\text{g/kg}$ 。印度芥菜-棉花轮作修复汞污染农田土壤, 棉花植株中其他部分富集汞, 而可利用部分的棉絮没有汞检出, 这有利于利用印度芥菜-棉花轮作实现边生产边修复土壤汞的目的。

环境中的有机配体与汞的相互作用可影响汞的迁移转化、赋存形态以及生物可利用性^[18]。有文献报道, 可溶性的有机质富里酸对铁锰氧化物结合汞无论是植物迁移活性还是水迁移活性均表现出极显著的促进效应^[16]。在一定的投加量下, 富里酸和汞可能形成部分容易溶出的络合物, 有利于印度芥菜、棉花的吸收。投加富里酸修复后并没有增加有效汞的含量, 与修复前相比, 反而显著降低, 在该研究中投加富里酸促进印度芥菜-棉花轮作修复汞污染土壤可能通过降低土壤中潜在有效汞含量而降低土壤汞的潜在风险。这种机理可能与配体化合物硫代硫酸盐促进植物吸收汞的机理相似^[7,19]。当富里酸投加量过高时, 作为可溶性的有机配体, 可能与汞更进一步发生络合反应形成不易被植物吸收的络合物形态, 或对土壤汞的溶出效果不佳, 也有可能汞发生其他反应形成不易被植物吸收的汞的化合物, 从而减弱植物对汞的富集作用^[20]。有文献报道, 硫代硫酸盐促进植物吸收汞时, 与汞络合形成的 $\text{Hg}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{2-}$ 比其他汞的络合形态更容易被植物吸收^[21]。有文献报道, 螯合剂可以直接通过沉淀、络合、酸化、氧化还原等方式改变重金属在土壤中的溶解性或者间接通过对土壤酶活性和微生物群落的作用来

影响重金属的活性^[22], 而富里酸作为一种有机螯合剂, 成分比较复杂, 与土壤根际微生物之间也存在着密切联系^[23], 所以其中相关机理可能更复杂, 有待进一步研究。

有相关文献报道甜菜-菊苣^[14]、菊苣-油菜^[14]、黑豆-油菜^[24]、大豆-油菜^[24] 轮作对土壤镉的修复, 而利用作物轮作对土壤汞修复的研究鲜有报道, 利用外加螯合剂促进轮作模式下植物修复汞污染土壤的研究报道更少。

在汞污染农田土壤中, 经过印度芥菜-棉花轮作 1 年的种植, 富里酸促进印度芥菜-棉花轮作下修复土壤汞, 促进植株吸收汞。有文献指出, 通过投加低浓度的促进剂, 长期种植植物修复, 是一种比较有效且经济的汞污染农田修复技术^[4]。所以, 投加富里酸可作为促进印度芥菜-棉花轮作修复低汞污染农田土壤的边生产边修复的潜在修复技术。

参考文献

- [1] 刘冲, 赵玲, 李秀华, 等. 苜蓿对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1034-1042.
- [2] 卢光华, 岳昌盛, 彭辉, 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.
- [3] 王燕, 李盛慧, 文静, 等. 某体温计厂附近土壤汞含量及影响因素研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(1): 283-285, 288.
- [4] 肖永红, 高良敏, 刘玉玲, 等. 淮南市十涧湖中汞污染现状研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(1): 472-474.
- [5] MCCARTHY D, EDWARDS G C, GUSTIN M S, et al. An innovative approach to bioremediation of mercury contaminated soils from industrial mining operations[J]. Chemosphere, 2017, 184: 694-699.
- [6] HUANG Y, DENG M H, LI T Q, et al. Anthropogenic mercury emissions from 1980 to 2012 in China[J]. Environmental pollution, 2017, 226: 230-239.
- [7] WANG J X, FENG X B, ANDERSON C W N, et al. Thiosulphate-induced mercury accumulation by plants: Metal uptake and transformation of mercury fractionation in soil-results from a field study[J]. Plant & soil, 2014, 375(1/2): 21-33.
- [8] RIZWAN M, ALI S, ZIA UR REHMAN M, et al. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: A review[J]. Science of the total environment, 2018, 631/632: 1175-1191.
- [9] LUO J, YE L, QI S, et al. Effect of electrode configurations on phytoremediation efficiency and environmental risk[J]. Plant & soil, 2018, 424(1/2): 607-617.
- [10] 曹诣, 余玮, 孙敬钊, 等. 苜蓿修复重金属污染土壤研究现状[J]. 作物研究, 2014, 28(6): 775-779.
- [11] 徐灿灿, 孙达, 王根荣, 等. 螯合剂促进印度芥菜修复低汞污染农田土壤[J]. 广东农业科学, 2018, 45(12): 56-61.
- [12] 张磊, 张磊. 螯合剂强化棉花对镉污染土壤修复的初步研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 321-326.
- [13] 贺希格都楞, 万家悦, 杨佳敏, 等. 扫帚菜-白菜轮作对白菜镉吸收的影响[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 508-517.
- [14] 陈璘涵, 曾红远, 葛一陈, 等. 2 种轮作模式对镉污染土壤修复潜力的比较[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3873-3878.
- [15] WANG J, XIA J, FENG X. Screening of chelating ligands to enhance mercury accumulation from historically mercury-contaminated soils for phytoextraction[J]. Journal of environmental management, 2017, 186(Part 2): 233-239.
- [16] 姚爱军, 青长乐, 牟树森. 腐殖酸对矿物结合汞环境迁移性的影响及其机制研究[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 274-277.
- [17] 王建旭, 张军方, 冯新斌, 等. 硫代硫酸铵添加对黄平大油菜富集土壤汞的影响-田间试验[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 992-997.
- [18] MAZURI N M, JONSSON S, THOTA S, et al. Enhanced availability of mercury bound to dissolved organic matter for methylation in marine sediments[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 2016, 194: 153-162.
- [19] WANG J, FENG X, ANDERSON C W N, et al. Implications of mercury speciation in thiosulfate treated plants[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(10): 5361-5368.

非藤本要大^[20];其次林窗内凹凸不平的地形导致土壤温度以及养分的异质性,对藤本分布也产生深刻影响^[21];此外,非藤本 Shannon-Wiener 指数与土壤温度及最近乔木 DBH 关系显著,表明林窗内的微环境是调节非藤本 Shannon-Wiener 指数的重要因素。林窗内环境状况是影响林下非藤本生存的首要因子,藤本分布异质性反映了环境差异性,这种差异性也是导致非藤本变异的潜在环境因子。

表 5 林下非藤本 Shannon-Wiener 指数、密度与相关生态因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis of non-liana Shannon-Wiener index, density and related ecological factors under forest

项目 Item	植物总密度 Total plant density	最近乔木 DBH Recent arbor DBH	温度 Temperature	湿度 Humidity
非藤本 Shannon-Wiener 指数 Non-liana Shannon-Wiener index	-0.587 *	-0.543 *	0.664 *	0.254
非藤本密度 Non-liana density	-0.548 *	-0.512 *	0.555 *	0.129

注: * 表示 $P<0.05$
Note: * indicated $P<0.05$

3.2 林下非藤本密度与环境因子的耦合性 与非藤本 Shannon-Wiener 指数变化规律类似,林冠下非藤本密度的影响因素主要有以下几个方面:①林下植物总密度;②林下土壤温度;③离林窗最近乔木的 DBH。植物总密度增大,植物种间在资源、空间的生态位重叠较大,竞争压力增加,林下非藤本多属草本,生态位小,竞争力弱,植物总密度越大,非藤本 Shannon-Wiener 指数越小^[22-23];岫峰岭地区充沛的雨量 and 较高的土温,提高了土壤酶活性与养分有效性,这有利于林下植物生长发育,非藤本密度与土壤温度显著正相关;距林窗最近乔木 DBH 越大,乔木对林窗遮阴效果越明显,林下植物光合作用越弱,这不利于林下植物生长发育,林下植物密度与离林窗最近乔木的 DBH 呈负相关^[24-25]。

4 结论

通过对衡阳岫峰岭国家森林公园林内藤本与非藤本的 Shannon-Wiener 指数调查发现:①林冠植物总 Shannon-Wiener 指数及非藤本 Shannon-Wiener 指数均随藤本密度的增加显著下降;②在 3 种藤本密度样方中,非藤本 Shannon-Wiener 指数低于藤本;③非藤本 Shannon-Wiener 指数受物种总密度、最近乔木 DBH 及土壤温度综合调节。结果表明:林冠下植物 Shannon-Wiener 指数受藤本显著影响,藤本较强生存与扩散能力以及受藤本影响下的环境因子是非藤本 Shannon-Wiener 指数变化的重要因素。

参考文献

[1] WRIGHT A, TOBIN M, MANGAN S, et al. Unique competitive effects of lianas and trees in a tropical forest understory[J]. *Oecologia*, 2015, 177(2): 561-569.

[2] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉的种群结构和空间分布格局[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(10): 2100-2105.

[3] 姜琳, 万丽, 吴磊, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被配置模式的生态恢复[J]. *湖南生态科学学报*, 2019, 6(3): 1-8.

[4] 杨宁, 杨满元, 姜琳, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(2): 320-325.

[5] 杨宁, 邹冬生, 付美云, 等. 紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2361-2368.

[6] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 90-96.

[7] BURNHAM R J, SANTANNA C V. Distribution, diversity, and traits of native, exotic, and invasive climbing plants in Michigan[J]. *Brittonia*, 2015, 67(4): 350-370.

[8] VAN DER HEIJDEN G M F, POWERS J S, SCHNITZER S A. Lianas reduce carbon accumulation and storage in tropical forests[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2015, 112(43): 13267-13271.

[9] WRIGHT S J, SUN I F, PICKERING M, et al. Long-term changes in liana loads and tree dynamics in a Malaysian forest[J]. *Ecology*, 2015, 96(10): 2748-2757.

[10] 吴良早, 史慧灵, 雷苑, 等. 昆明城区大学校园与公园绿地植物组成研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2016, 31(5): 812-822.

[11] 杨宁, 付美云, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同土地利用模式下土壤种子库特征[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2324-2330.

[12] 唐登明, 李双全. 观赏藤本植物在城市园林中的应用与发展研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(26): 12986-12987, 13084.

[13] 唐一思, 石慰, 曾文豪, 等. 广西天然林中藤本植物区系组成及系统发育多样性[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8750-8757.

[14] 王灯, 苟光前, 孙巧玲, 等. 贵州黔东南野生木质藤本植物资源多样性及开发利用[J]. *草业科学*, 2017, 34(7): 1506-1515.

[15] 琚煜熙, 尚晴, 王忠伟, 等. 鸡公山落叶阔叶林藤本植物寄主选择与分布规律[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(2): 205-209.

[16] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化[J]. *林业科学*, 2016, 52(8): 146-156.

[17] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2693-2701.

[18] SCHNITZER S A. A mechanistic explanation for global patterns of liana abundance and distribution[J]. *The American naturalist*, 2005, 166(2): 262-276.

[19] 袁春明, 刘文耀, 杨国平. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林木质藤本植物的多样性与空间分布[J]. *生物多样性*, 2015, 23(3): 332-340.

[20] 胡亮, 李鸣光, 李贞. 中国种子植物区系中的藤本多样性[J]. *生物多样性*, 2010, 18(2): 212-218.

[21] KUSUMOTO B, ENOKI T, WATANABE Y. Community structure and topographic distribution of lianas in a watershed on Okinawa, south-western Japan[J]. *Journal of tropical ecology*, 2008, 24(6): 675-683.

[22] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1516-1524.

[23] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 996-1001.

[24] 唐一思, 石慰, 曾文豪, 等. 广西天然林中藤本植物区系组成及系统发育多样性[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8750-8757.

[25] 杨宁, 邹冬生, 李建国, 等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 87-93.

(上接第 88 页)

[20] 徐灿灿, 孙达, 王根荣, 等. 富里酸结合叶面施肥用于油菜修复低汞污染农田土壤[J]. *环境工程*, 2019, 37(7): 199-203.

[21] WANG J, FENG X, ANDERSON C W, et al. Implications of mercury speciation in thiosulfate treated plants[J]. *Environmental science & technology*, 2012, 46(10): 5361-5368.

[22] 樊扬帆, 刘云国, 龚小敏, 等. 外源螯合剂 CA 和 NTA 对苈麻修复铅镉复合污染土壤的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4547-4552.

[23] JONES D L. Organic acids in the rhizosphere-A critical review[J]. *Plant and soil*, 1998, 205(1): 25-44.

[24] 常银川, 陈奕暄, 窦源, 等. 黑豆-油菜与大豆-油菜轮作模式土壤镉修复能力比较[J]. *作物研究*, 2020, 34(2): 153-157, 160.