

电子废弃物拆解污染土壤施用污泥发酵渣对香根草吸收与转运重金属的影响

郭江山, 顾卫华, 白建峰, 董滨, 庄绪宁, 赵静, 王景伟

引用本文:

郭江山, 顾卫华, 白建峰, 董滨, 庄绪宁, 赵静, 王景伟. 电子废弃物拆解污染土壤施用污泥发酵渣对香根草吸收与转运重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1452-1459.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1240>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

客土改良铜尾矿对香根草生理特征及重金属吸收的影响

方青, 丁子微, 孙庆业, 王宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 83-91 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0902>

纳米羟基磷灰石钝化修复重金属污染土壤的稳定性研究

邢金峰, 仓龙, 葛礼强, 周东美

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1271-1277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.007>

混合改良剂钝化修复酸性多金属污染土壤的效应——基于重金属形态和植物有效性的评价

邹富桢, 龙新宪, 余光伟, 黄莉敏, 赵仁欣

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1787-1795 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1660>

园林废弃物堆肥对铅镉污染土壤的修复效果

刘源鑫, 李维庭, 孙向阳, 李素艳, 张润哲, 马杰

农业环境科学学报. 2022, 41(4): 802-810 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0880>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王风, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭江山, 顾卫华, 白建峰, 等. 电子废弃物拆解污染土壤施用污泥发酵渣对香根草吸收与转运重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1452–1459.

GUO J S, GU W H, BAI J F, et al. Effects of sludge fermentation residue on the accumulation and transport of heavy metals in *Vetiveria zizanioides* at an e-waste dismantling site[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1452–1459.



开放科学 OSID

电子废弃物拆解污染土壤施用污泥发酵渣对香根草吸收与转运重金属的影响

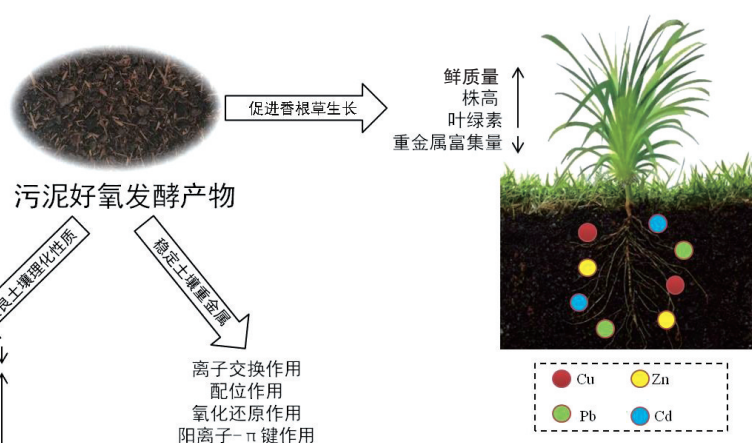
郭江山¹, 顾卫华^{1,3}, 白建峰^{1*}, 董滨², 庄绪宁¹, 赵静¹, 王景伟¹

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014)

摘要: 为探究施用污泥高温好氧发酵渣(以下简称“发酵渣”)对电子废弃物拆解污染土壤改良和植被恢复的影响,通过盆栽试验比较添加不同剂量发酵渣(3%和6%)对土壤有机质、养分、重金属形态及香根草吸收与转运重金属等的影响。结果显示:施用发酵渣显著提高了土壤溶解性有机质的荧光指数和在226~400 nm范围内的紫外吸光度积分值,但显著降低了自生源指数;显著提高了土壤电导率、有效磷和速效钾含量,但显著降低了土壤pH。与未修复土壤相比,所有处理(含不添加发酵渣的CK处理)均提高了重金属稳定态比例;与CK相比,施用发酵渣显著提高了Cu、Pb、Zn和Cd的稳定态比例,增幅分别为4.8~7.3、7.8~9.0、3.7~6.4个和1.8~4.0个百分点。施用发酵渣促进了香根草生长,其中3%添加量处理使香根草鲜质量、株高和叶绿素a+b含量分别显著增加8.2%、11.9%和6.6%,但6%添加量处理对株高和叶绿素a+b含量的提高效果不显著。施用发酵渣降低了香根草中Cu、Cd、Zn和Pb的富集量,降幅分别为10.4%~20.6%、24.0%~52.0%、2.5%~5.1%和12.4%~23.6%;抑制了香根草对Cu、Zn和Pb向地上部转运,但促进了Cd向地上部转运。研究表明,施用污泥发酵渣可以改良土壤性状,促进重金属稳定和香根草生长,具有污染场地土壤生态修复的应用潜力。

关键词: 污泥发酵渣;土壤修复;重金属;腐殖质;香根草

中图分类号:X53;X173;X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)07-1452-08 doi:10.11654/jaes.2021-1240



Effects of sludge fermentation residue on the accumulation and transport of heavy metals in *Vetiveria zizanioides* at an e-waste dismantling site

GUO Jiangshan¹, GU Weihua^{1,3}, BAI Jianfeng^{1*}, DONG Bin², ZHUANG Xuning¹, ZHAO Jing¹, WANG Jingwei¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. School of

收稿日期: 2021-11-01 录用日期: 2022-02-17

作者简介: 郭江山(1996—),男,河南郑州人,硕士研究生,从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: 844402859@qq.com

*通信作者: 白建峰 E-mail: jlbai@sspu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578397);国家重点研发计划项目(2019YFC1906100)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51578397);The Key Research and Development Program of China(2019YFC1906100)

Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To explore the effects of high-temperature aerobic fermentation sludge residue (hereinafter referred to as ‘fermentation residue’) on soil improvement and *Vetiveria zizanioides* growth at an e-waste dismantling site, a potting experiment was performed by adding different dosages of fermentation residue to the soil (the ratios of fresh weight were 3% and 6%). Parameters such as soil organic matter, nutrients, and heavy metals fraction, accumulation, and transport in the plant were analyzed. The results showed that the application of fermentation residue significantly increased the fluorescence index and the integral value of UV absorbance of soil dissolved organic matter in the range of 226~400 nm, whereas the biogenic index showed the opposite trend. The fermentation residue significantly increased the soil conductivity and the content of available phosphorus and potassium but significantly reduced the soil pH. Compared to the original soil without remediation, all treatments increased the proportion of the stable fractions of heavy metals. Compared to the control, the application of fermentation residue significantly increased the proportion of Cu, Pb, Zn, and Cd in stable fractions by 4.8~7.3, 7.8~9.0, 3.7~6.4 percent points, and 1.8~4.0 percent points, respectively. The application of fermentation residue promoted the growth of *Vetiveria zizanioides*, and the addition of 3% fermentation residue significantly increased the fresh weight, plant height, and chlorophyll a+b content by 8.2%, 11.9%, and 6.6%, respectively. The fermentation residue reduced the concentrations of Cu, Cd, Zn, and Pb in the plant at rates of 10.4%~20.6%, 24.0%~52.0%, 2.5%~5.1%, and 12.4%~23.6%, respectively. Fermentation residue inhibited the transport of Cu, Zn, and Pb to the aboveground parts of the plant, but promoted the transport of Cd. Our results indicate that the application of fermentation residue introduces humus into the soil, improves soil properties, and promotes the stabilization of heavy metals and the growth of *Vetiveria zizanioides*. Fermentation residue has potential application value for the ecological restoration of soil in contaminated sites.

Keywords: sludge fermentation residue; soil remediation; heavy metal; humus; *Vetiveria zizanioides*

近年来,电子废弃物的产生量随着电子产品的大量使用而剧增^[1]。由于人为不规范的拆解,电子废弃物被随意倾倒或填埋,造成拆解场地周边地下水和土壤污染。有研究表明,电子废弃物拆解场地存在多种重金属与有机污染物的复合污染,这些污染物最终导致拆解场地植被被破坏等生态环境问题的发生^[2]。例如:张昱等^[3]通过调查和计算获得了浙江台州某拆解地的土壤重金属污染指数,发现Cd、Cu、Pb、Zn为重度污染;顾卫华等^[4]量化了拆解地土壤中多环芳烃的含量及其对人体健康造成的风险,发现存在强烈的环境风险。由于过高的污染物浓度以及贫瘠的土壤养分条件,拆解场土壤依靠自身条件很难快速地进行植被恢复,因此大多数场地在植被恢复前期需要辅以人工措施,其中增加养分含量是土壤植被恢复的重要基础。

污泥好氧发酵是污泥稳定化处理的方式之一,是指污泥中的有机质在微生物作用下分解并转化为腐殖质的过程^[5]。在该过程中,污泥中的有机质矿化分解,腐殖质大量形成,重金属的生物有效性降低^[6]。污泥发酵产物一方面富含氮、磷、钾等养分元素,另一方面腐殖质中特殊结构的官能团可改善土壤理化性质并稳定土壤重金属,这为加速植被恢复提供了有利条件。目前已有研究采用盆栽或场地试验通过植物发芽率、生物量、茎根比、叶绿素含量等指标进行了定

量评估,发现污泥发酵产物可以显著促进植物生长^[7-8]。因此,污泥好氧发酵还田是实现污泥资源化利用和土壤植被恢复的双赢选择。

重金属污染土壤的植物修复技术包括植物萃取和植物稳定,前者主要利用根系分泌物的酸化作用吸收重金属,适用于低、中度污染土壤,而后者主要利用根系分泌物的螯合、沉淀作用稳定重金属,适用于重度污染土壤^[9]。香根草(*Vetiveria zizanioides*)属多年生大型草本植物,具有生物量大、根系发达、适应性强、生长周期短及经济价值高等优点,可充当污染土壤植被恢复的先锋植物^[10]。虽然目前已有学者对污泥发酵产物以及香根草应用于矿山生态修复进行了相关研究,但对高浓度、多种类重金属污染的电子废弃物拆解地土壤的修复研究却鲜有报道。鉴于此,本研究以电子废弃物拆解污染土壤为研究对象,通过盆栽试验解析添加不同剂量的污泥好氧发酵渣对土壤养分、重金属形态、香根草重金属吸收与转运等的影响,期为污泥发酵产物在电子废弃物拆解污染土壤生态修复中的应用提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自浙江省台州市路桥区某场地(长约6 m、宽约4 m),该地曾人为集中堆放和有序拆解电

子废弃物。根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),将该场地以“3×2”的方式划分6个面积相等的单元,采集每单元的表层土壤(0~20 cm)50 kg。土样采集后混匀,自然风干,移除其中的动植物碎屑,并筛分至<2 mm,常温储存备用。试验所用污泥来自常州市某污水处理厂,将污泥与秸秆等原材料按一定比例混合后堆入高温反应器,以7 d为一个周期进行翻堆,49 d后获得发酵渣。用破碎机将发酵渣破碎并筛分至<2 mm,常温储存备用。土壤和发酵渣的基本理化性质和重金属含量如表1所示。

试验所用植物品种为香根草,种子购于河北沧州某公司。

表1 土壤和污泥发酵渣的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the soil and sludge fermentation residue

性质 Property	土壤 Soil	污泥发酵渣 Sludge fermentation residue
pH	7.85	6.48
含水率 Moisture content/%	—	32.4
电导率 Conductivity/(mS·cm ⁻¹)	0.38	4.87
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	7.1	584.7
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.36	5.01
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	8.3	807.4
速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	52.9	1 246.2
全铜 Total copper/(mg·kg ⁻¹)	2 877	497
全锌 Total zinc/(mg·kg ⁻¹)	15 255	5 482
全镉 Total cadmium/(mg·kg ⁻¹)	39.1	1.5
全铅 Total lead/(mg·kg ⁻¹)	2 949.8	36.5

1.2 盆栽试验

试验于2021年4月5日至5月20日在上海第二工业大学温室中进行。称取1 kg土样装入直径12 cm、高18 cm的塑料花盆中,然后将发酵渣和土壤按鲜质量比3%(T1)、6%(T2)均匀混合,另设不添加发酵渣的对照处理(CK),每个处理3个重复。先加入去离子水以保持花盆中土壤水分在田间持水量的80%左右,15 d后播种(每盆0.6 g)。待种子萌发5 d后,每盆保留50株幼苗,25 d后收获植株。在香根草生长期定期补充去离子水以维持土壤水分在田间持水量的80%左右。

香根草在收割时尽量保证根系的完整性,并用直尺测量株高,同时采集各盆中土壤。植物样品先后用自来水和去离子水清洗,一部分用于测定叶绿素含量,另一部分置于烘箱中经105℃杀青2 h后75℃烘

干,用于测定重金属(Cu、Zn、Pb、Cd)含量。土壤样品室内风干,压碎后过2 mm筛,进行pH、电导率、速效钾、有效磷含量测定以及土壤溶解性有机质光谱表征。将过2 mm筛的土样用四分法取出一部分继续碾磨,过0.1 mm孔径筛后进行土壤重金属形态测定。

1.3 分析测试方法

植株样品中的重金属含量参考GB/T 30376—2013测定,叶绿素含量参考NY/T 3082—2017测定,土壤pH依据HJ 962—2018测定,电导率依据HJ 802—2016测定,有效磷含量依据HJ 704—2014测定,速效钾含量参考LY/T 1234—2015测定,重金属形态参考GB/T 25282—2010测定。

按照1 g待测土壤样品加入10 mL水的比例加入超纯水,在恒温振荡器中以25℃、200 r·min⁻¹条件往复振荡提取24 h。悬浊液在4℃、10 000 r·min⁻¹条件下离心20 min,上清液过0.45 μm水系滤膜,所得滤液中的有机质为土壤溶解性有机质(DOM)^[11]。采用HORIBA公司Fluoro Max型分子荧光光谱仪对一部分DOM进行荧光表征,测定条件如下:激发波长(*E_x*)为200~450 nm,步进为5 nm;发射波长(*E_m*)为200~550 nm,步进为1 nm;*E_x*与*E_m*的狭缝宽度均为5 nm,积分时间为0.02 s,仪器系统自动扣除空白、校正瑞利效应和拉曼散射。另一部分DOM用于紫外光谱的测定,使用仪器为普析TU-1901双束紫外-可见光光度计,扫描波长为200~700 nm,扫描波长间隔为1 nm。

1.4 重金属相关指标计算方法

1.4.1 重金属稳定态比例(*F_s*)

参考GB/T 25282—2010测定重金属的弱酸提取态比例(*F₁*)、可还原态比例(*F₂*)、可氧化态比例(*F₃*)与残渣态比例(*F₄*)。根据LIU等^[12]的研究以*F₃*与*F₄*之和作为*F_s*,以此评价重金属在土壤中的稳定性。*F_s*值越大,表明重金属的稳定性越强,生物有效性越低。

1.4.2 重金属稳定态比例变化量(ΔF_s)

ΔF_s 为土壤修复后重金属稳定态比例(*F_{s2}*)与修复前稳定态比例(*F_{s1}*)之差,以此评价重金属稳定修复的效果。 ΔF_s 值越大,表明有更多的重金属形态向稳定态转化,说明修复效果越好。

1.4.3 植物重金属富集量(BC)

BC为植物地下部重金属含量(*C₁*)与地上部含量(*C₂*)之和,以此表示植物体内所含重金属的总量。

1.4.4 植物重金属迁移系数(TF)

TF为*C₂*与*C₁*的比值,以此来评价重金属在植物体内由地下部迁移至地上部的难易程度。TF值越大

表明重金属越易在植物的地上部积累^[13]。

1.5 数据统计及分析

采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理, SPSS 23.0 软件对数据进行方差分析(ANOVA)和 Tukey 检验, Origin 9.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤 DOM 的光谱特征

图1为土壤DOM的三维荧光光谱图。依据CHEN等^[14]对光谱的划分,光谱分为5个区域:区域I($E_x < 250\text{ nm}$, $E_m < 330\text{ nm}$)和区域II($E_x < 250\text{ nm}$, $330\text{ nm} < E_m < 380\text{ nm}$)分别代表两类芳香族蛋白质;区域III($E_x < 250\text{ nm}$, $E_m > 380\text{ nm}$)代表类富里酸物质;区域IV($E_x > 250\text{ nm}$, $E_m < 380\text{ nm}$)代表可溶性微生物代谢产物;区域V($E_x > 250\text{ nm}$, $E_m > 380\text{ nm}$)代表类胡敏酸物质。与CK相比,T1和T2处理的区域V中出现了新的荧光峰,区域III和区域V中荧光峰的强度依次增强。

表2为土壤DOM光谱参数的变化情况。荧光指数(FI)可以表征有机质的来源^[15],是指在激发波长370 nm处,荧光发射光谱强度在450 nm和500 nm处的比值。自生源指数(BIX)可以表征有机质生物利用度的高低^[16],是指在激发波长310 nm处,发射波长在380 nm和430 nm处的荧光强度比值。 $S_{226-400}$ 值是DOM在226~400 nm范围内紫外吸光度的积分值,该值可表征有机质中具备不饱和和 π 键官能团(尤其是苯环结构)的相对含量^[17]。与CK相比,施用发酵渣显著提高了土壤DOM的FI和 $S_{226-400}$,显著降低了BIX。

2.2 土壤pH、养分和重金属稳定态变化

图2和表3为土壤pH、养分和重金属稳定态的变

表2 污泥发酵渣对土壤溶解性有机质光谱参数的影响

Table 2 Effects of sludge fermentation residue on spectral parameters of soil dissolved organic matter

处理 Treatment	荧光指数 FI	自生源指数 BIX	226~400 nm 紫外吸光度积分值 $S_{226-400}$
CK	1.67±0.02b	0.96±0.01a	3.02±0.27c
T1	1.86±0.01a	0.90±0.01b	6.56±0.27b
T2	1.86±0.03a	0.87±0.01c	10.08±0.22a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

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

化情况。与CK相比,施用发酵渣(T1和T2处理)显著降低了土壤pH(0.3个和0.4个单位),显著提高了土壤电导率(63.4%和234.5%);显著增加了土壤有效磷含量(130.7%和220.9%)和速效钾含量(92.2%和318.4%)。

与未修复土壤相比,所有处理(含CK)均提高了 $F_s(\Delta F_s > 0)$ 。与CK相比,施用发酵渣(T1和T2处理)显著提高了Cu、Pb、Zn和Cd的 ΔF_s ,幅度分别为4.8~7.3、7.8~9.0、3.7~6.4个百分点和1.8~4.0个百分点。

2.3 香根草生长及重金属吸收与转运情况

图3为香根草生长的变化情况。与CK相比,T1处理显著提高了株高(11.9%)、鲜质量(8.2%)和叶绿素a+b含量(6.6%);T2处理仅显著提高鲜质量(7.1%),对株高和叶绿素a+b含量的提高效果不显著。

表4为香根草重金属吸收与转运的变化情况。与CK相比,施用发酵渣显著降低了香根草对Cu和Cd的富集量,幅度分别为10.4%~20.6%和24.0%~52.0%,但对Zn和Pb的降低效果不显著。此外,施用发酵渣显著降低了Cu、Zn和Pb的迁移系数,但显著

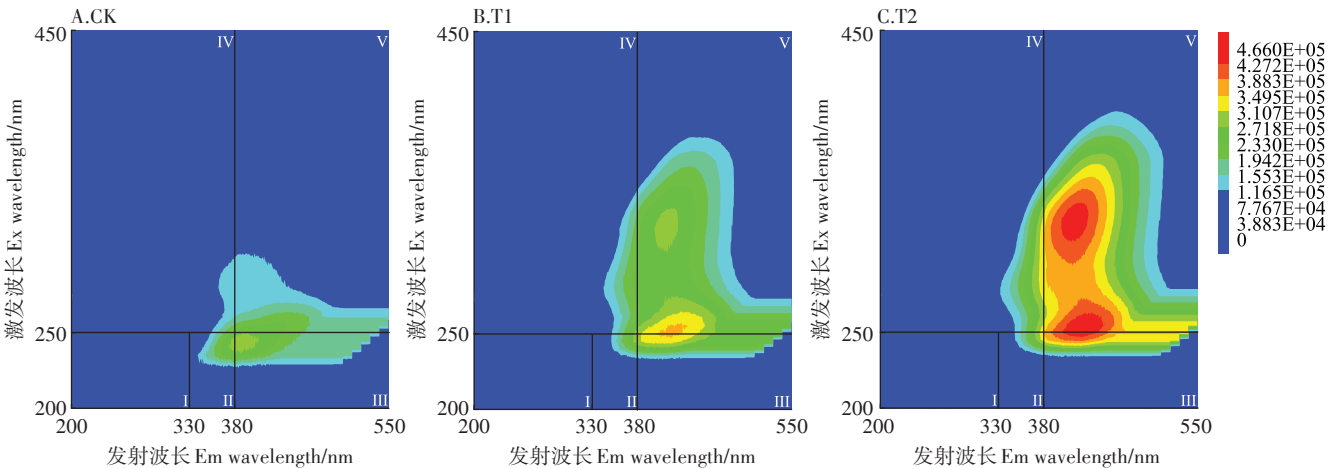


图1 土壤溶解性有机质的三维荧光光谱图

Figure 1 3D fluorescence spectrums of the soil dissolved organic matter

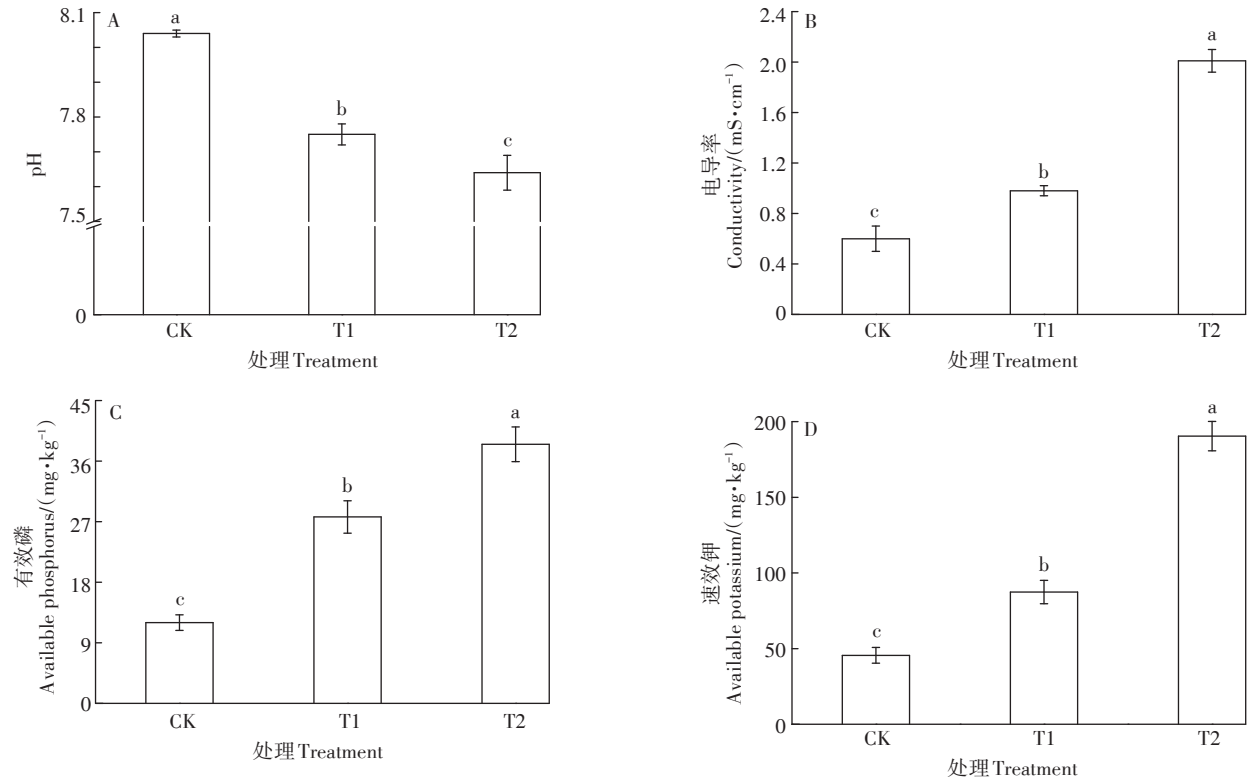


图2 污泥发酵渣对土壤pH、电导率和养分的影响

Figure 2 Effects of sludge fermentation residue on the soil pH, conductivity and nutrients

表3 污泥发酵渣对土壤重金属稳定性的影响

Table 3 Effects of sludge fermentation residue on the stabilization of soil heavy metals

处理 Treatment	重金属稳定态比例变化量(ΔF _s) Change on the ratio of the stable fractions of heavy metals			
	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	24.7%±0.5%b	4.8%±1.8%b	4.4%±0.7%b	10.4%±2.6%b
T1	29.5%±2.0%a	11.2%±2.2%a	6.2%±1.2%ab	19.4%±1.8%a
T2	32.0%±2.1%a	8.5%±2.0%ab	8.4%±2.2%a	18.2%±0.9%a

提高了Cd的迁移系数。

3 讨论

3.1 污泥发酵渣对土壤DOM的影响

施用发酵渣即引入了腐殖质,从而改变了土壤DOM的光谱参数。根据图1的分析结果可知,施用发酵渣增加了类富里酸物质的含量,并出现了类胡敏酸物质,且两类物质的含量随发酵渣施用量的增加而增大。污泥在好氧发酵过程中,主要产生富里酸和胡敏酸两大类腐殖质,其中胡敏酸的分子量更大,结构更复杂,可在环境中长期稳定存在^[18]。根据MCKNIGHT等^[19]对FI的分类,当FI<1.4时表明DOM的来源主要

为外源植物输入,当FI>1.9时表明DOM的来源主要为内源微生物代谢输入。根据表2的分析结果可知,所有处理组的FI均在1.4~1.9之间,表明研究区土壤DOM一部分来源于香根草的根系分泌物,一部分来源于土壤微生物的代谢产物。BIX可以表征有机质生物利用度的高低,该值越大表明有机质的生物利用度越高^[16]。施用发酵渣显著降低了DOM的BIX,表明其生物利用度降低。根据图1区域V的荧光强度推断,随着发酵渣施用量的增加,土壤中类胡敏酸物质含量增加,而该类物质较稳定,因此造成土壤有机质生物利用度降低,同时说明施用发酵渣提高了土壤的腐殖化程度。

3.2 污泥发酵渣对土壤pH、养分和重金属稳定态的影响

有研究表明,秸秆所含的木质纤维素在发酵过程中会产生较多的羧基,这可能造成本研究施用的发酵渣显弱酸性^[20],因此施用发酵渣显著降低了土壤pH。土壤电导率和养分含量显著提高,一方面是因为发酵渣本身的电导率和养分含量较高,另一方面可能是发酵渣中腐殖质的作用。腐殖质本身含有大量带负电的官能团,对阳离子(K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等)有较强的吸附能力^[21]。腐殖质巨大的表面积还可增加无机胶体对

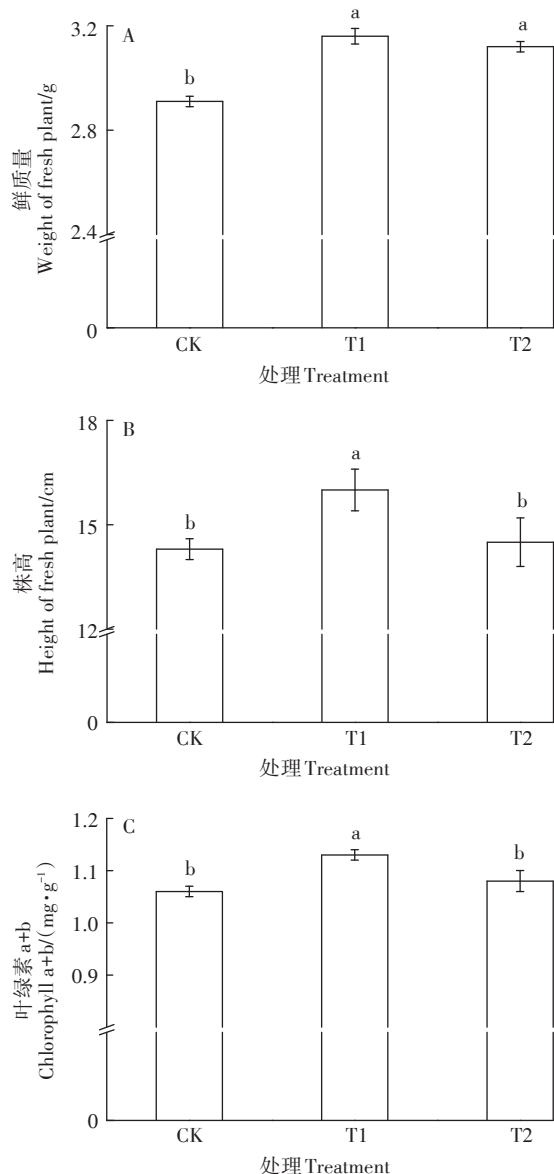


图3 污泥发酵渣对香根草株高、鲜质量及叶绿素含量的影响

Figure 3 Effects of sludge fermentation residue on the growth of *Vetiveria zizanioides*

阳离子的吸附能力,因此提高了土壤速效钾含量^[22]。腐殖质的多羧基性质使其能够与土壤中的磷酸盐进行竞争吸附,从而减少铁铝氧化物对磷的吸附^[23],同

时腐殖质中的有机酸和酚类可以与磷酸盐矿物表面发生反应,改变金属络合、表面电荷或金属桥接,从而提高了土壤有效磷含量^[24]。

当土壤处于重度重金属污染时,植物可通过根系分泌OH⁻或特殊蛋白质改变根际土壤pH,从而提高重金属的稳定性^[25]。与原始未修复的土壤相比,CK处理pH和重金属稳定态比例有所提高,表明香根草的修复形式为稳定修复,这与陈友媛等^[26]的研究结果相似。而T1和T2处理中所有重金属稳定态比例的变化量均大于CK,表明发酵渣中的腐殖质也起到了稳定作用,包括4个方面^[27-29]:①离子交换作用。腐殖质中大量带负电的官能团可通过范德华力、氢键、静电作用吸附K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺,这些离子可以和重金属阳离子发生置换,从而将其捕获并固定在腐殖质上;②配位作用。腐殖质中的含氧官能团(羟基、羧基)可与重金属进行配位结合,形成稳定的配合物或螯合物;③氧化还原作用。腐殖质具有的醌基-氢醌氧化还原电子对和酚基共轭π电子系统,可以作为电子穿梭体提供大量的氧化还原点位,从而改变变价重金属的化合价;④阳离子-π键作用。腐殖质中的芳香环共轭π电子体系可与重金属阳离子空的d轨道形成紧密的共价电子云结构,相当于形成内轨和外轨配合物的配位键,其键结强度超过氢键。根据表2的分析结果可知,施用发酵渣显著提高了土壤DOM的S₂₂₆₋₄₀₀值,表明土壤中含共轭π电子体系的苯环类化合物含量相对增加,有利于重金属的稳定^[17]。

3.3 污泥发酵渣对香根草吸收和转运重金属的影响

重金属富集量和迁移系数是衡量香根草对重金属耐受性的重要指标^[30]。施用发酵渣抑制了香根草对重金属的吸收和对Cu、Zn、Pb向地上部的转运。香根草的重金属富集量减少,主要是因为土壤重金属稳定态比例升高,重金属的生物有效性降低。所有处理中香根草重金属的迁移系数均小于1,说明重金属被香根草根吸收后较难向地上部转运,这与宋清梅等^[31]的研究结果类似,这可能是因为根细

表4 污泥发酵渣对香根草重金属富集量(BC)和迁移系数(TF)的影响

Table 4 Effects of sludge fermentation residue on heavy metal bioconcentrations (BC) and transfer factors (TF) of *Vetiveria zizanioides*

处理 Treatment	Cu		Zn		Cd		Pb	
	BC/(mg·kg ⁻¹)	TF	BC/(mg·kg ⁻¹)	TF	BC/(mg·kg ⁻¹)	TF	BC/(mg·kg ⁻¹)	TF
CK	151.7±5.7a	0.065±0.003a	553.6±17.1a	0.075±0.004a	2.5±0.3a	0.063±0.002b	64.4±6.4a	0.054±0.001a
T1	135.9±4.1b	0.040±0.002b	539.5±15.3a	0.071±0.003a	1.9±0.1b	0.137±0.004a	49.2±7.2a	0.040±0.001b
T2	120.4±3.6c	0.025±0.001c	525.1±19.3a	0.064±0.001b	1.2±0.1c	0.130±0.004a	56.4±9.1a	0.026±0.002c

胞中的细胞壁和液泡能对重金属离子起到固定作用^[32]。植物将大部分重金属滞留或固定在根部,阻止或减少其向地上部分运输,从而减轻重金属对地上部敏感器官的毒害作用^[33]。施用发酵渣抑制了香根草对Cu、Zn、Pb的转运,但对Cd的作用相反,这可能是因为一定条件下重金属之间存在拮抗作用^[34],具体需进一步研究。

由于重金属会抑制植物叶绿素的合成^[35],因此施用发酵渣后香根草体内重金属含量减少,这为合成叶绿素提供了有利条件。施用发酵渣还改善了土壤肥力,有利于香根草生长。与CK相比,T2处理对香根草株高和叶绿素含量的提高效果并不显著,可能是该条件下盐分含量较高(电导率达到了 $2.01 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$),对香根草有一定胁迫作用。此外,本研究中发酵渣Zn含量为 $5482 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对土壤存在二次污染风险,因此不宜过多施用。综上,从加速植被恢复的角度考虑,本研究中发酵渣的最佳施用量为3%。

4 结论

(1)施用污泥发酵渣增加了土壤养分含量,促进了香根草的生长。

(2)施用污泥发酵渣促进了土壤重金属向稳定态转化,抑制了香根草对重金属的富集和Cu、Zn和Pb从地下部向地上部转运,但促进了Cd从地下部向地上部转运。

(3)从加速植被恢复的角度,同时考虑重金属Zn的环境风险,本研究中发酵渣的最佳施用量为3%。

参考文献:

- [1] 张馨艺. 全球电子废弃物增长迅速[J]. 生态经济, 2020, 36(10): 1-4. ZHANG X Y. Global e-waste is growing rapidly[J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(10): 1-4.
- [2] 张金莲, 丁疆峰, 林浩忠, 等. 电子垃圾不当处置的重金属和多氯联苯污染及其生态毒理效应[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 891-899. ZHANG J L, DING J F, LIN H Z, et al. Pollution of heavy metals and polychlorinated biphenyls by improper e-waste dismantling activities and its ecotoxicological effect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 891-899.
- [3] 张昱, 胡君利, 白建峰, 等. 电子废弃物拆解区周边农田土壤重金属污染评价及成因解析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1228-1234. ZHANG Y, HU J L, BAI J F, et al. Contamination assessment and genesis analysis of heavy metals in farmland soils around a waste electrical and electronic equipments disassembling area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1228-1234.
- [4] 顾卫华, 姚海燕, 白建峰, 等. 浙江台州典型电子废弃物无序拆解区土壤多环芳烃污染风险评估[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 67-71. GU W H, YAO H Y, BAI J F, et al. Risk assessment of soil polycyclic aromatic hydrocarbons pollution in a typical e-waste dismantling area in Taizhou, Zhejiang[J]. *China Environmental Management*, 2019, 11(1): 67-71.
- [5] WEI L, ZHU F, LI Q, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis[J]. *Environment International*, 2020, 144: 106093.
- [6] WANG L, LI Y, PRASHER S O, et al. Organic matter, a critical factor to immobilize phosphorus, copper, and zinc during composting under various initial C/N ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121745.
- [7] HAN S H, LEE J C, JANG S S, et al. Composted sewage sludge can improve the physiological properties of *Betula schmidtii* grown in tailings [J]. *Journal of Plant Biology*, 2004, 47(2): 99-104.
- [8] CHU S, WU D, LIANG L L, et al. Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13408.
- [9] 方青, 丁子微, 孙庆业, 等. 客土改良铜尾矿对香根草生理特征及重金属吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 83-91. FANG Q, DING Z W, SUN Q Y, et al. Effects of alien soil improvement of copper tailings on physiological characteristics and heavy metals uptake of *Vetiveria zizanioides*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 83-91.
- [10] DUDAI N, TSION I, SHAMIR S Z, et al. Agronomic and economic evaluation of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) as means for phytoremediation of diesel polluted soils in Israel[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 211: 247-255.
- [11] 刘慧云, 鲜青松, 刘琛, 等. 生物炭对紫色土耕地土壤中溶解性有机物含量和组成特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 718-726. LIU H Y, XIAN Q S, LIU C, et al. Effects of biochar application on content and characteristics of dissolved organic matter in arable land of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2017, 36(4): 718-726.
- [12] LIU L H, HUANG L, HUANG R, et al. Immobilization of heavy metals in biochar derived from co-pyrolysis of sewage sludge and calcium sulfate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123648.
- [13] LIU G, MENG J, HUANG Y, et al. Effects of carbide slag, lodestone and biochar on the immobilization, plant uptake and translocation of As and Cd in a contaminated paddy soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115194.
- [14] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 37(24): 5701-5710.
- [15] 许金鑫, 王初, 姚东京, 等. 崇明东滩湿地土壤溶解性有机质的光谱特征分析[J]. 环境工程, 2020, 38(11): 218-225. XU J X, WANG C, YAO D J, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matters in Chongming Dongtan wetland[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11): 218-225.
- [16] 张莉, 刘涵, 赵海超, 等. 不同年限露天煤矿排土场土壤剖面溶解性有机质荧光和吸光特征[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 1941-

1951. ZHANG L, LIU H, ZHAO H C, et al. Fluorescence and absorption characteristics of dissolved organic matter in soil profile of open-pit coal mine dump in different years[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(8):1941-1951.
- [17] 李鸣晓, 何小松, 刘骏, 等. 鸡粪堆肥水溶性有机物特征紫外吸收光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11):3081-3085. LI M X, HE X S, LIU J, et al. Study on the characteristic UV absorption parameters of dissolved organic matter extracted from chicken manure during composting[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11):3081-3085.
- [18] 毛宇翔, 李涵, 耿音, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中DOM的光谱动态变化特征[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(2):794-803. MAO Y X, LI H, ZHI Y, et al. Dynamic change features of DOM spectra in process of aerobic composition of municipal sewage sludge[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(2):794-803.
- [19] MCKNIGHT D M, BOYER E W, WESTERHOFF P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1):38-48.
- [20] ZHANG Q, ZOU D, ZENG X, et al. Effect of the direct use of biomass in agricultural soil on heavy metals: Activation or immobilization?[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272:115989.
- [21] TIPPING E. Cation binding by humic substances[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005.
- [22] XU H, YAN Z, CAI H, et al. Heterogeneity in metal binding by individual fluorescent components in a eutrophic algae-rich lake[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2013, 98(1):266-272.
- [23] YANG S, ZHANG Z, CONG L, et al. Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil[J]. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 2013, 13(3):526-533.
- [24] HUA Q X, LI J Y, ZHOU J M, et al. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4):533-538.
- [25] PIGNATTELLI S, COLZII, BUCCIANTI A, et al. Exploring element accumulation patterns of a metal excluder plant naturally colonizing a highly contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 227/228:362-369.
- [26] 陈友媛, 卢爽, 惠红霞, 等. 印度芥菜和香根草对Pb污染土壤的修复效能及作用途径[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(9):1365-1372.
- CHEN Y Y, LU S, HUI H X, et al. Remediation efficiency and pathways of *Brassica juncea* and *Vetiveria zizanioides* L. for Pb-contaminated soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(9):1365-1372.
- [27] SEVILLA-PÉREA A, MINGORANCE M D. Field approach to mining-dump revegetation by application of sewage sludge co-compost and a commercial biofertilizer[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 158(1):95-102.
- [28] YANG F, TANG C Y, ANTONIETTI M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 5(1):6221-6239.
- [29] KEILUWEIT M, KLEBER M. Molecular-level interactions in soils and sediments: The role of aromatic π -systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10):3421-3429.
- [30] DU J, GUO Z, LI R, et al. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for Cd/Zn phytoremediation and research on physiological mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261:114213.
- [31] 宋青梅, 蔡信德, 吴颖欣, 等. 香根草对污染土壤水溶态重金属组分胁迫响应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(12):2715-2722. SONG Q M, CAI X D, WU Y X, et al. Response of *Vetiveria zizanioides* to the stress of water-soluble components of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2715-2722.
- [32] HU R, SUN K, SU X, et al. Physiological responses and tolerance mechanisms to Pb in two xerophiles: *Salsola passerina* Bunge and *Chenopodium album* L. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 205/206:131-138.
- [33] HUANG G, ZHOU X, GUO G, et al. Variations of dissolved organic matter and Cu fractions in rhizosphere soil induced by the root activities of castor bean[J]. *Chemosphere*, 2020, 254:126800.
- [34] 许钟丹, 郝俊, 陈超, 等. 香根草种植年限对煤矸石山土壤重金属的吸收与富集能力[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(6):1241-1246. XU Z D, HAO J, CHEN C, et al. Effects of different planting years of *Vetiveria zizanioides* on its absorption and enrichment capacity for soil heavy metals in coal gangue piles[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(6):1241-1246.
- [35] LIANG P, PARDEE A. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction[J]. *Science*, 1992, 257(5072):967-971.

(责任编辑:李丹)