农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

污泥处理渣对电子废弃物拆解污染土壤的改良作用

郭江山, 顾卫华, 白建峰, 董滨, 庄绪宁, 赵静, 张承龙

引用本文:
郭江山, 顾卫华, 白建峰, 董滨, 庄绪宁, 赵静, 张承龙. 污泥处理渣对电子废弃物拆解污染土壤的改良作用[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(12): 2613-2621.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1021

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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
农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1452-1459 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1240

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

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

污泥-凹凸棒石共热解生物炭对矿区重金属污染土壤的钝化修复效果研究
陶玲, 马奔, 李中兴, 周怡蕾, 任珺
农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1251-1260 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1297

EDTA与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染红壤中铅镉的影响
史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 蒋代华, 黄智刚
农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1634-1641 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1349

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. 污泥处理渣对电子废弃物拆解污染土壤的改良作用[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(12): 2613-2621.

GUO J S, GU W H, BAI J F, et al. Treated sludge residue amelioration of contaminated soil at an e-waste dismantling site[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2613-2621.

开放科学 OSID

污泥处理渣对电子废弃物拆解污染土壤的改良作用

郭江山[1,2], 顾卫华[1,4], 白建峰[1*], 董滨[3], 庄绪宁[1], 赵静[1], 张承龙[1]

(1.上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2.中交(苏州)城市开发建设有限公司, 江苏 苏州 215031; 3.同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 4.浙江工业大学环境学院, 杭州 310014)

摘 要:为探究两种污泥处理渣对电子废弃物拆解污染土壤的改良作用,通过盆栽试验解析添加热解渣和好氧发酵渣对土壤养分、酶活性、重金属浸出与植物(黑麦草和香根草)生长、吸收重金属的影响,并通过模糊隶属函数评价土壤改良效果。结果表明:施用两种污泥处理渣(施用量均为5%)向土壤引入了类胡敏酸物质;显著提高土壤电导率(220%~238%)、铵态氮(16%~66%)、阳离子交换量(37%~84%)、有效磷(34%~42%)、速效钾(44%~97%)、有机质(17%~47%)含量和荧光素双醋酸酯(FDA)酶活性(67%~119%);显著提高植物鲜质量(32%~36%)、株高(18%~22%)及叶绿素(12%~16%)、磷(33%~48%)和钾(12%~21%)含量;显著降低植物Cu(17%~33%)、Zn(5%~9%)、Pb(32%)、Cd(35%)和丙二醛(18%~22%)含量;显著降低土壤Cu(10%~19%)、Zn(18%~20%)、Pb(10%~16%)和Cd(13%~15%)的浸出量。土壤改良效果的排序为好氧发酵渣>热解渣,香根草>黑麦草。研究表明,施用两种污泥处理渣均促进了植物生长和土壤改良,其中好氧发酵渣和香根草在电子废弃物拆解污染土壤生态修复领域具有更佳的应用潜力。

关键词:污泥热解;污泥好氧发酵;土壤污染;重金属;生态修复

中图分类号:X705; X53 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2022)12-2613-09 doi:10.11654/jaes.2022-1021

Treated sludge residue amelioration of contaminated soil at an e-waste dismantling site

GUO Jiangshan[1,2], GU Weihua[1,4], BAI Jianfeng[1*], DONG Bin[3], ZHUANG Xuning[1], ZHAO Jing[1], ZHANG Chenglong[1]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. CCCC(Suzhou) Urban Development and Construction Co., Ltd., Suzhou 215031, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The effects of two types of treated sludge residue on soil improvement were evaluated in a potting experiment by adding pyrolysis residue and aerobic fermentation residue to the soil. The effects of parameters such as soil nutrients, enzyme activities, leaching content of heavy metals, and plants(*Lolium perenne* and *Vetiveria zizanioides*) on heavy metal accumulation and growth were analyzed. Additionally, the effects of soil improvement were evaluated using the fuzzy membership function. The results showed that application(5%) of the two types of treated sludge residue introduced humic acid-like substances into the soil. The soil conductivity(220%-238%), ammonium nitrogen(16%-66%), cation exchange capacity(37%-84%), available phosphorus(34%-42%), available potassium(44%-97%), organic matter content(17%-47%), and enzymatic activity of fluorescein diacetate(67%-119%) were significantly increased. The fresh weight(32%-36%), height(18%-22%), chlorophyll(12%-16%), phosphorus(33%-48%), and potassium content(12%-21%) of plants were also significantly increased. The concentrations of Cu(17%-33%), Zn(5%-9%), Pb(32%), Cd(35%), and malondialdehyde(18%-22%)

收稿日期:2022-10-12 **录用日期**:2022-11-28

作者简介:郭江山(1996—),男,河南郑州人,硕士研究生,现从事生态修复工程管理研究。E-mail:844402859@qq.com

***通信作者**:白建峰 E-mail:jfbai@sspu.edu.cn

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

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

were significantly reduced. The leaching amount of Cu(10%−19%), Zn(18%−20%), Pb(10%−16%), and Cd(13%−15%) of soil were significantly reduced. The order of soil improvement effects of each treatment was as follows: aerobic fermentation residue > pyrolysis residue, *V. zizanioides*>*L. perenne*. Our results indicate that the two methods for treating sludge residue promote improvements in soil quality and plant growth. Aerobic fermentation residue and *V. zizanioides* show application potential for the ecological restoration of soil at e-waste dismantling sites.

Keywords: sludge pyrolysis; sludge aerobic fermentation; soil pollution; heavy metal; ecological restoration

电子废弃物的产生量随着电子产品的大量使用而剧增[1]。由于早期不规范的拆解活动,如随意倾倒和填埋电子废弃物,造成拆解场地土壤重金属污染和植被破坏等生态环境问题[2]。由于拆解场地土壤的物理结构差、重金属含量高和养分含量低,植物在自然条件下生长慢、生物量小,甚至难存活。此外,裸露土壤中的重金属极易通过降水冲刷、渗滤液和大风扬尘等途径威胁周边地区的水环境和农产品安全[3]。因此,亟需针对拆解场地土壤开展有效的植被重建和污染控制工作。

好氧发酵和热解是两种稳定化处理污泥的方式[4-5]。前者指污泥在氧气氛围、50~90 ℃条件和微生物作用下转化为富含腐殖质残渣的过程,后者指污泥在氮气氛围和200~700 ℃条件下转化为富碳残渣的过程。上述两种污泥处理渣均含有氮、磷、钾等养分元素,特殊的结构和官能团可稳定重金属和改善土壤质量[6-7],为植物生长提供有利条件。此外,我国农业农村部在《有机肥料》(NY/T 525—2021)标准中禁止选用污泥作为有机肥料的生产原料,因此将污泥处理渣应用于场地土壤修复和改良是未来推进污泥资源化利用的重要途径。

黑麦草(*Lolium perenne*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)是两种多年生草本植物,具有抗逆性强、生物量大、生长快和根系发达等特点,可作为场地土壤植被重建的对象,为后续生态恢复奠定基础[8-10]。虽然目前有关单一重金属污染土壤修复的研究较多,但针对电子废弃物拆解场地复合重度污染土壤修复的研究,以及施用热解渣和好氧发酵渣的土壤改良对比研究和评价较少。在土壤改良评价中,人们通常关注土壤肥力指标,而土壤重金属浸出、FDA酶活性与植物叶绿素、丙二醛含量等生理指标可分别从土壤毒性、微生物活性与植物生长等方面丰富土壤改良评价的角度。

鉴于此,本研究以我国典型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两种污泥处理渣对土壤养分、酶活性、重金属浸出与植物生长、吸收重金属的影响,并通过模糊隶属函数评价土壤改良效果,以期为污泥处理渣在电子废弃物拆解污染土壤生态修复领域的应用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用于制备好氧发酵渣的污泥来源于常州市某污水处理厂,将风干的污泥与秸秆等原材料按一定比例混合后堆入60 ℃反应器,7 d为一周期进行翻堆,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;用于制备热解渣的污泥来源于上海市某污水处理厂,将污泥105 ℃烘干,室温冷却并研磨过100目筛,然后置于管式炉中,在氮气氛围、升温速率10 ℃·min^{-1}、600 ℃终温条件下热解1 h,冷却至室温后储存备用。两种污泥处理渣的基本理化性质如表1所示。

供试土壤采自浙江省台州市路桥区某场地(121.37° E,28.58° N),该场地曾集中堆放和无序拆解电子废弃物。采集表层(0~20 cm)土壤300 kg,混匀自然风干,移除动植物碎屑,并筛分至<2 mm,常温储存备用。土壤基本理化性质如表1所示。

试验所用植物品种为黑麦草(*Lolium perenne*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*),种子购于河北沧州富益春种子公司。

1.2 盆栽试验

试验于2021年5月1日至6月15日在上海第二工业大学温室中进行。称取1 kg供试土壤装入直径12 cm、高18 cm的塑料花盆中,然后按鲜质量比5%分别单独混入好氧发酵渣(TS)和热解渣(TB),另设不添加污泥处理渣的对照(CK),每个处理用于种植黑麦草和香根草各3个重复。先用去离子水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0.5 g)。待种子萌发5 d后,每盆保留50株幼苗,25 d后收获植株。在植物生长期间定期用去离子

表1 污泥处理渣和土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of treated sludge residue and soil

理化指标 Physicochemical property	好氧发酵渣 Aerobic fermentation residue	热解渣 Pyrolysis residue	供试土壤 Soil
pH	6.68	7.90	7.85
含水率 Moisture content/%	36.8	—	—
有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	971	485	7.06
电导率 Conductivity/(mS·cm^{-1})	5.74	1.19	0.38
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg^{-1})	873	377	8.30
速效钾 Available potassium/(mg·kg^{-1})	1 519	416	52.9
阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol·kg^{-1})	77.7	32.6	6.71
全氮 Total nitrogen/(g·kg^{-1})	4.64	1.03	0.36
全铜 Total copper/(mg·kg^{-1})	287	585	2 877
全锌 Total zinc/(mg·kg^{-1})	982	1 448	15 255
全镉 Total cadmium/(mg·kg^{-1})	0.26	2.84	39.1
全铅 Total lead/(mg·kg^{-1})	29.4	70.7	2 950

水维持土壤水分在田间持水量的80%左右。植物收获时尽量保持根系的完整性，测量株高后称量鲜质量（地上与地下部总质量）。植物样品先用自来水和超纯水清洗，然后用无菌棉擦干水分。一部分样品用于测定叶绿素和丙二醛含量，前者依据分光光度法（NY/T 3082—2017）测定，后者参考《植物生理学实验指导》测定[11]；另一部分样品置于烘箱中经105 ℃杀青10 min后调至65 ℃烘至干燥，用于测定重金属（Cu、Zn、Pb、Cd）、P和K含量（地上与地下部总量），依据电感耦合等离子体原子发射光谱法（GB/T 30376—2013）测定。

同时采集土壤样品，在室内风干后，土壤pH依据电位法（HJ 962—2018）测定，电导率依据电极法（HJ 802—2016）测定，阳离子交换量依据三氯化六氨合钴浸提-分光光度法（HJ 889—2017）测定，有效磷含量依据碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法（HJ 704—2014）测定，速效钾含量依据乙酸铵浸提-电感耦合等离子体原子发射光谱法（LY/T 1234—2015）测定，铵态氮含量依据靛酚蓝比色法（LY/T 1228—2015）测定，有机质含量参考重铬酸钾氧化-比色法测定[12]，荧光素双醋酸酯（FDA）酶活性参考《环境土壤学》测定[13]，重金属浸出参考美国环境保护署制定的方法（Toxicity Characteristic Leaching Procedure，TCLP）测定[14]。另一部分土壤样品用于三维分子荧光表征，按照1 g∶20 mL的比例加入超纯水，在23 ℃、180 r·min^{-1}条件下振荡提取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滤膜，所得滤液中的有机质为土壤溶解性有机质[15]。采用HORIBA公司Fluoro Max型分子荧光光谱仪对DOM进行三维分子荧光表征，测试条件为：激发波长（*Ex*）为220~450 nm，步进为5 nm；发射波长（*Em*）为290~550 nm，步进为1 nm；*Ex*与*Em*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、校正瑞丽效应和拉曼散射。

1.3 土壤改良评价方法

选择土壤养分、酶活性、重金属浸出和植物生理共16个评价指标，依据变异系数法确定各指标的权重[16]，计算公式如（1）、（2）所示。

$$V_i=\sigma_i/N_i \quad (1)$$

$$W_i=100\times(V_i/\Sigma V_i) \quad (2)$$

式中：V_i为第i项指标的变异系数，σ_i为第i项指标的标准差，N_i为第i项指标的算术平均值，W_i为第i项指标的权重，设置各指标的权重总和为100。

构建隶属函数以量化各处理组的土壤改良效果[17]，计算公式如（3）~（5）所示。

$$R_i=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \quad (3)$$

$$R_i=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \quad (4)$$

$$U=\Sigma(W_i\times R_i) \quad (5)$$

式中：X_i为第i项指标测定值，X_{max}和X_{min}分别为所测指标的最大值和最小值；若X指标与土壤改良效果呈正相关，用式（3），反之用式（4）；最后根据式（5）将各处理所含各指标的隶属函数值加权求和，U值越大表示该处理的土壤改良效果越好。

1.4 数据统计

利用Excel 2007整理数据，利用SPSS 22.0进行方

差分析(ANOVA)和Tukey检验,利用Origin 9.0绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤性状变化

由表2可见,与CK相比,施用好氧发酵渣(TS)显著提高土壤电导率(220%~238%)、铵态氮(22%~66%)、阳离子交换量(71%~84%)、速效钾(73%~97%)、有机质(22%~47%)含量和FDA酶活性(67%~119%),显著提高种植黑麦草土壤的有效磷含量(38%);施用热解渣(TB)显著提高土壤有效磷(34%~42%)和速效钾(44%~46%)含量,显著提高种植香根草土壤的铵态氮(16%)、有机质(17%)含量和种植黑麦草土壤的阳离子交换量(37%);两种污泥处理渣对土壤pH的降低效果不显著。

图1为土壤溶解性有机质三维荧光光谱,依据CHEN等[18]的划分:区域Ⅰ(*Ex*<250 nm,*Em*<330 nm)和区域Ⅱ(*Ex*<250 nm,330 nm<*Em*<380 nm)分别代表类色氨酸和类酪氨酸;区域Ⅲ(*Ex*<250 nm,*Em*>380 nm)代表类富里酸;区域Ⅳ(*Ex*>250 nm,*Em*<380 nm)代表溶解性微生物代谢产物;区域Ⅴ(*Ex*>250 nm,*Em*>380 nm)代表类胡敏酸。与CK相比,TS(图1B和图1E)和TB(图1C和图1F)处理的区域Ⅴ中检测到明显的荧光峰。

2.2 植物生长变化

与CK相比,施用好氧发酵渣(TS)显著提高两种植物鲜质量(33%~36%)、株高(18%~22%)、叶绿素(14%~16%)和钾含量(12%~21%),显著提高香根草磷含量(48%);施用热解渣(TB)显著提高两种植物鲜质量(32%~35%)和株高(19%~20%),显著提高香根草叶绿素(12%)、磷含量(33%)和黑麦草钾含量(16%);两种污泥处理渣显著降低黑麦草丙二醛含量(18%~22%),对香根草影响不显著(图2)。由表3可见,与CK相比,施用好氧发酵渣(TS)显著降低两种植物Zn含量(5%~9%),显著降低香根草Cu(33%)和Cd(35%)含量;施用热解渣(TB)显著降低两种植物Cu(17%~26%)和Zn(6%)含量,显著降低黑麦草Pb含量(32%)。

2.3 土壤毒性变化

与CK相比,施用好氧发酵渣(TS)显著降低土壤Cu(10%~19%)和Pb(10%~13%)的浸出量,显著降低种植黑麦草土壤Cd(13%)和种植香根草土壤Zn(18%)的浸出量;施用热解渣(TB)显著降低土壤Cu的浸出量(17%~18%),显著降低种植香根草土壤Zn(20%)、Pb(16%)和种植黑麦草土壤Cd(15%)的浸出量(图3)。

2.4 土壤改良评价

由表4可见,权重(*W*)排名前5的评价指标依次为:土壤FDA酶活性(14)>阳离子交换量=速效钾含量(11)>铵态氮含量(8)>有效磷含量(7),共占总权重的51%。根据各处理组所含各指标的加权隶属函数(*U*)计算结果,未施用和施用相同污泥处理渣时(CK,TS,TB),种植香根草土壤的*U*值(12.73,81.99,59.23)大于黑麦草的(6.62,81.39,54.63);植物相同时,施用好氧发酵渣土壤的*U*值(81.99,81.39)大于热解渣的(59.23,54.63)。总体而言,各处理组的*U*值排序为:好氧发酵渣>热解渣,香根草>黑麦草。

3 讨论

施用发酵渣显著提高了土壤电导率,可能受其本身电导率较高(5.74 mS·cm^{-1},表1)的影响。有研究

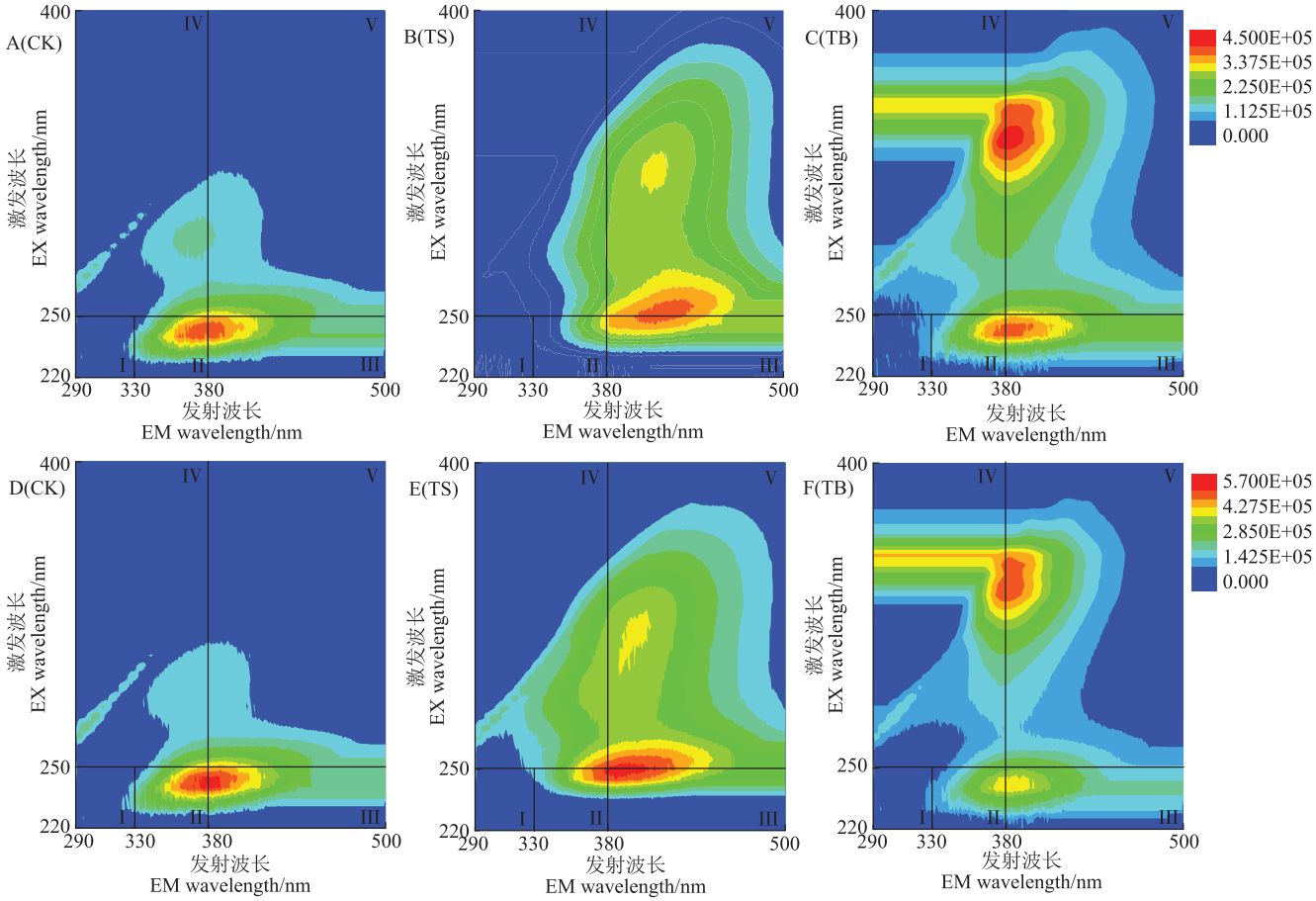
表2 污泥处理渣对土壤化学和生物学性质的影响

Table 2 Effects of treated sludge residue on chemical and biological properties of soil

处理 Treatment		pH	电导率 Conductivity/(mS·cm^{-1})	铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg·kg^{-1})	阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus/(mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium/(mg·kg^{-1})	有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	FDA酶活性 Enzymatic activity of FDA/[μg·(g·min)$^{-1}$]
黑麦草 *Lolium perenne*	CK	8.20±0.22a	0.56±0.17b	18.4±2.0b	7.08±1.0c	19.8±1.4b	54.7±4.4c	9.7±0.3b	0.032±0.005b
	TS	7.80±0.19a	1.89±0.34a	22.5±1.3a	13.0±1.2a	27.3±2.1a	107.5±10.2a	11.8±0.8a	0.070±0.004a
	TB	8.09±0.15a	0.74±0.06b	20.2±1.1ab	9.67±0.8b	28.2±3.4a	78.8±8.7b	10.5±0.7ab	0.040±0.004b
香根草 *Vetiveria zizanioides*	CK	8.25±0.25a	0.60±0.08b	16.1±0.4c	6.50±1.5b	23.9±2.7b	53.2±2.9b	9.4±0.2c	0.039±0.005b
	TS	7.81±0.19a	1.92±0.18a	26.8±2.2a	11.1±0.9a	25.8±1.5b	91.9±7.1a	13.8±1.0a	0.065±0.003a
	TB	7.98±0.20a	0.68±0.04b	18.6±1.3b	8.14±1.2ab	32.0±2.9a	77.9±7.5a	11.0±0.4b	0.042±0.005b

注:相同指标下,同种植物间的不同小写字母表示处理组间的差异显著(P<0.05,n=3)。下同。

Note: On the same property, different lowercase letters represent significant differences (P<0.05, n=3) between different treatments on the same plant. The same below.



图A~C和图D~F分别代表种植黑麦草和香根草的土壤

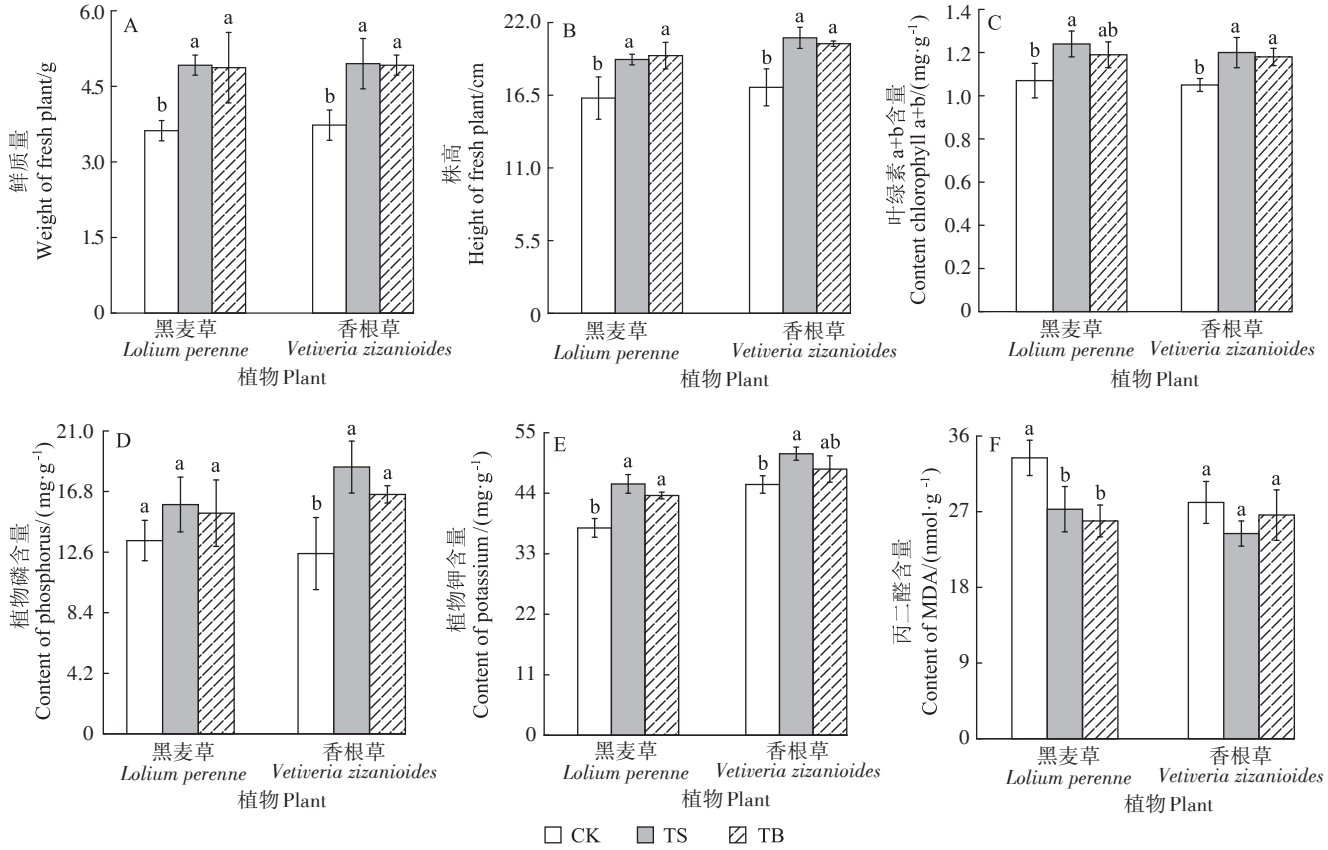
Figures A–C and D–F represent the soil of *Lolium perenne* and *Vetiveria zizanioides*, respectively

图1 土壤溶解性有机质三维荧光光谱图

Figure 1 3D fluorescence spectra of soil dissolved organic matter

表明,当土壤电导率高于2 mS·cm^{-1}时,会对植物产生盐分胁迫[19]。本研究中土壤电导率最高达到1.92 mS·cm^{-1},因此在实际中需注意控制施用量以避免抑制植物生长。施用两种污泥处理渣的土壤在光谱区域Ⅴ中检测到明显的荧光峰,可能受其本身所含胡敏酸在土壤中释放所致。污泥中的有机质经过好氧发酵转化为胡敏酸,而经过热解形成了高度缩聚结构的炭,与胡敏酸类似[20-21]。阳离子交换量、有机质、铵态氮、有效磷和速效钾是土壤肥力指标,施用两种污泥处理渣提高了土壤肥力,一方面因为其本身富含土壤养分,另一方面因为其大量带负电的官能团和巨大的表面积对阳离子(K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}和NH_4^+等)有较强的吸附能力[22-23],从而提高土壤阳离子交换量、铵态氮和速效钾含量。此外有研究表明,污泥处理渣可通过吸附磷酸盐以减少铁铝氧化物对磷的吸附[24],从而提高土壤有效磷含量。土壤FDA酶活性提高表明施用两种污泥处理渣提高了土壤微生物的活性[25],土壤的生态功能进一步改善。

由于植物重金属含量与土壤有效态重金属含量呈正相关[26],因此根据植物重金属含量降低推断污泥处理渣提高了土壤重金属的稳定性,潜在机理包括[27-29]:①离子交换作用。污泥处理渣大量带负电的官能团可吸附K/Ca/Na/Mg离子,这些离子可以和重金属离子发生置换;②配位作用。污泥处理渣的含氧官能团可与重金属形成稳定的配合物或螯合物;③阳离子-π键作用。污泥处理渣的芳环π电子结构可与重金属离子形成紧密的共价电子云结构;④重金属离子可与污泥处理渣中的基团结合形成氢氧化物、碳酸盐、硅酸盐和磷酸盐等沉淀,也可在带负电荷的矿物表面和官能团之间形成稳定性更强"离子桥",从而抑制植物对重金属的吸收。重金属胁迫不但会抑制植物叶绿素的合成,还会促使脂质过氧化产生过多的丙二



相同指标下,同种植物间的不同小写字母表示处理组间的差异显著(P<0.05,n=3)。下同

Under the same property, different lowercase letters represent significant differences (P<0.05, n=3) between different treatments on the same plant. The same below

图2 污泥处理渣对植物生长的影响

Figure 2 Effects of treated sludge residue on plant growth

表3 污泥处理渣对植物吸收重金属的影响

Table 3 Effects of treated sludge residue on heavy metal accumulation of plants

处理 Treatment		植物重金属含量 Heavy metals content of plants/(mg·kg⁻¹)			
		Cu	Zn	Pb	Cd
黑麦草 *Lolium perenne*	CK	233.2±12.3a	794.2±8.6a	112.6±14.2a	3.68±1.04a
	TS	219.4±5.3a	758.1±5.4b	92.3±7.3a	2.03±0.85a
	TB	194.4±9.6b	750.4±10.2b	76.5±4.9b	1.94±0.39a
香根草 *Vetiveria zizanioides*	CK	211.2±2.9a	538.7±6.9a	75.5±11.7a	2.71±0.34a
	TS	141.4±7.5b	489.2±13.4b	63.7±5.7a	1.77±0.16b
	TB	155.7±11.5b	507.3±8.6b	69.1±2.8a	1.84±0.56ab

醛[30]。施用两种污泥处理渣后植物体内重金属含量减少,有利于叶绿素的合成和缓解过氧化对细胞的毒害作用。此外,土壤养分含量提高也有利于植物的生长。

土壤重金属浸出量降低,表明污泥处理渣与植物共同控制了重金属的环境风险。虽然普遍的观点认为污泥处理渣对土壤重金属起稳定作用,但本研究中植物根系的作用以及与污泥处理渣之间的关系(如协同、竞争等)有待深入研究。由于土壤和植物指标间的关系较难准确确定,因此利用模糊隶属函数模型对土壤改良效果做出综合评价。土壤FDA酶活、阳离子交换量、速效钾、铵态氮和有效磷含量受污泥处理渣影响的波动幅度较大,是土壤改良评价的关键指标。依据加权隶属函数计算结果,未施用和施用相同污泥处理渣时,种植香根草的土壤改良效果优于黑麦草;植物相同时,施用好氧发酵渣的土壤改良效果优于热解渣。两种污泥来源不同、稳定化处理工艺不同,导致土壤改良效果不同。总体而言,好氧发酵渣的养分含量更高,可能更有利于植物生长、土壤微生物活动和土壤生态功能改善,与香根草联合效果最佳。此外,考虑到制备好氧发酵渣的成本和能耗更低,因此可优先推广在电子废弃物拆解污染土壤生态修复领域的应用,但需注意施用量以避免因电导率过高而抑制植物生长。

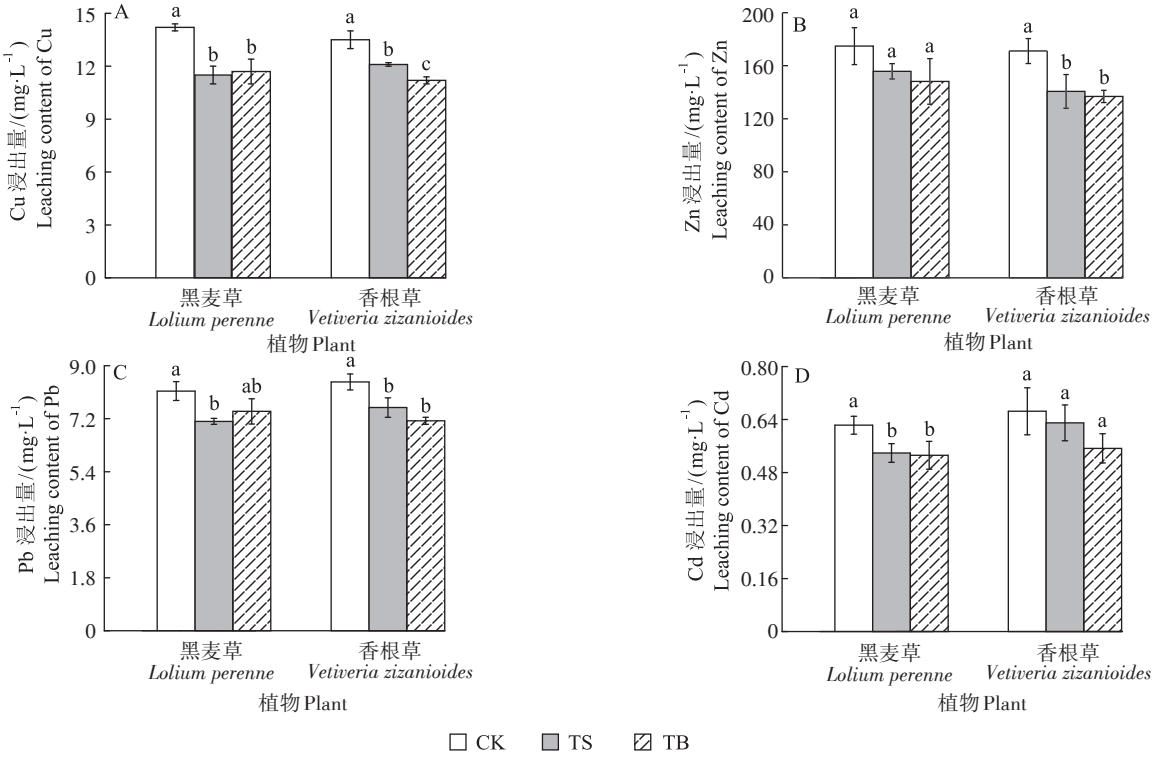


图3 污泥处理渣对土壤重金属浸出的影响

Figure 3 Effects of treated sludge residue on heavy metals leaching of soil

表4 评价指标权重和隶属函数计算结果

Table 4 Weight of evaluation index and results of membership function

指标 Index	相关性 Correlation	变异系数 Variation coefficient	权重(*W*) Weight	处理Treatment					
				黑麦草 *Lolium perenne*			香根草 *Vetiveria zizanioides*		
				CK	TS	TB	CK	TS	TB
铵态氮 Ammonium nitrogen	+	0.18	8	1.68	4.80	3.04	0	8.00	1.84
阳离子交换量 Cation exchange capacity	+	0.27	11	0.99	11.00	5.39	0	7.81	2.75
速效钾 Available potassium	+	0.27	11	0.33	11.00	5.17	0	7.81	4.95
有效磷 Available phosphorus	+	0.16	7	0	4.27	4.83	2.38	3.43	7.00
有机质 Organic matter	+	0.15	6	0.42	3.30	1.50	0	6.00	2.16
FDA 酶活性 Enzymatic activity of FDA	+	0.32	14	0	14.00	2.94	2.52	12.18	3.64
Cu浸出 Cu leaching	−	0.10	4	0	3.60	3.32	0.92	2.80	4.00
Zn浸出 Zn leaching	−	0.10	4	0	2.00	2.80	0.40	3.60	4.00
Pb浸出 Pb leaching	−	0.07	3	0.69	3.00	2.25	0	1.95	2.97
Cd浸出 Cd leaching	−	0.09	4	1.28	3.80	4.00	0	1.04	3.36
鲜质量 Fresh weight of plant	+	0.14	6	0	5.88	5.64	0.48	6.00	5.88
株高 Fresh height of plant	+	0.10	4	0	2.56	2.80	0.72	4.00	3.60
叶绿素 Chlorophyll	+	0.07	3	0.33	3.00	2.22	0	2.37	2.04
植物磷 Plant phosphorus	+	0.14	6	0.90	3.42	2.82	0	6.00	4.08
植物钾 Plant potassium	+	0.10	4	0	2.36	1.76	2.36	4.00	3.16
丙二醛 Malondialdehyde	−	0.11	5	0	3.40	4.15	2.95	5.00	3.80
总和(*U*)Sum	—	2.38	100	6.62	81.39	54.63	12.73	81.99	59.23
排序 Order	—	—	—	6	2	4	5	1	3

注:+和−分别表示指标与土壤改良效果呈正相关和呈负相关。

Note: + and − indicates that the index is positively and negatively correlated with the soil improvement effect, respectively.

4 结论

（1）施用污泥处理渣提高了土壤养分含量和酶活性，控制了土壤重金属的浸出风险。

（2）施用污泥处理渣抑制了植物吸收重金属，促进了植物生长。

（3）好氧发酵渣的养分含量和土壤改良效果优于热解渣，可优先推广在电子废弃物拆解污染土壤生态修复领域的应用，但需注意施用量以避免因电导率过高而抑制植物生长。

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] 任露陆, 曹美苑, 王固宁, 等. 电子废弃物拆解区周边农田土壤重金属污染及生态风险[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(10):50-53. REN L L, CAO M Y, WANG G N, et al. Heavy metal contamination and ecological risks in the farmland soil around the e-waste disassembling site [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(10):50-53.

[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] WEI L, ZHU F, LI Q, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO_2-equivaient emissions analysis[J]. *Environment International*, 2020, 144(3):106093.

[5] 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.

[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] FANG L, YAN F, CHEN J J, et al. A novel recovered compound phosphate fertilizer produced from sewage sludge and its incinerated ash[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(17):6611-6621.

[8] 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.

[9] 孙园园, 关萍, 何杉, 等. 镉胁迫对多花黑麦草镉积累特征、生理抗性及超微结构的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(8):1589-1597. SUN Y Y, GUAN P, HE S, et al. Effects of Cd stress on features of Cd accumulation, physiological response and ultrastructure in *Lolium multiflorum*[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(8):1589-1597.

[10] 杨峥屏, 黄千杜. 国土空间生态修复专项规划关键技术[J]. 规划师, 2021, 37(23):17-22. YANG Z P, HUANG Q D. The key technique of ecological space restoration planning[J]. *Planners*, 2021, 37(23):17-22.

[11] 陈建勋. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2006. CHEN J X. Experimental guidance of plant physiology[M]. Guangzhou:South China University of Technology Press, 2006.

[12] 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. LU R K. Agriculture chemical analysis methods of soil[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[13] 贾建丽. 环境土壤学[M]. 二版. 北京:化学工业出版社, 2016. JIA J L. Environmental soil science[M]. 2nd Edition. Beijing:Chemical Industry Press, 2016.

[14] CHANG E E, CHANG P C, LU P H, et al. Comparisons of metal leachabiliy for various wastes by extraction and leaching methods[J]. *Chemosphere*, 2001, 45(1):91-99.

[15] 刘慧云, 鲜青松, 刘琛, 等. 生物质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.

[16] 闫泽华, 张乐道, 周静, 等. 基于变异系数法的马铃薯莜面锅巴研制[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(1):110-117. YAN Z H, ZHANG L D, ZHOU J, et al. Development of potato-oat flour rice crust based on coefficient of variation[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(1):110-117.

[17] TANG C, CHEN Y, ZHANG Q, et al. Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 176:42-49.

[18] 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.

[19] 骆永明. 重金属污染土壤的修复机制与技术发展[M]. 北京:科学技术出版社, 2016. LUO Y M. Remediation mechanism and technological development of heavy metal polluted soil[M]. Beijing:Science and Technology Press, 2016.

[20] 毛宇翔, 李涵, 职音, 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 compostion of municipal sewage sludge[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(2):794-803.

[21] 周丹丹, 王薇, 张军, 等. 生物炭中溶解性有机质对污染物环境行为的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7):1492-1498. ZHOU D D, WANG W, ZHANG J, et al. Effect of biochar-derived dissolved organic matter on environmental behavior of pollutants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7):1492-1498.

[22] SEVILLA-PEREA A, MINGORANCE M D. Field approach to min-

ing-dump revegetation by application of sewage sludge co-compost and a commercial biofertilizer[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 158(1):95-102.

[23] 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, 50(10):6221.

[24] YANG F, SUI L, TANG C Y, et al. Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768:145106.

[25] 陈伟, 周波, 束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18):3850-3856. CHEN W, ZHOU B, SHU H R. Effects of organic fertilizer and biochar on root system and microbial functional diversity of *Malus hupehensis rehd*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18):3850-3856.

[26] 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.

[27] 刘振刚, 夏宇, 孟芋含, 等. 生物质炭材料修复重金属污染土壤的研究进展:修复机理及研究热点分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4):1140-1148. LIU Z G, XIA Y, MENG Y H, et al. Research advances in biomass-based carbon materials for remediation of heavy metal contaminated soil: Immobilization mechanism and analysis of related studies[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4):1140-1148.

[28] PALANSOORIYA K N, SHAHEEN S M, CHEN S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environment International*, 2020, 134:105046.

[29] XU D M, FU R B, WANG J X, et al. Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: Available stabilizing materials and associated evaluation methods - A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321:128730.

[30] 李松, 孙向阳, 李素艳, 等. 改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6):1229-1235. LI S, SUN X Y, LI S Y, et al. Effects of amendments on cadmium accumulation and transport and the physiological characteristics of pakchoi cabbage in cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6):1229-1235.

(责任编辑:叶飞)