

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

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

尿素混合生物质炭穴施对土壤氮含量及酶活性的影响

张莉, 任建新, 韩国君, 马乐元, 孙小妹

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1974-1982 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0135>

中药渣配合氮磷肥施用对铅锌尾矿的改良效果研究

李凤梅, 杨胜香, 彭禧柱, 张晓君, 彭清静

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2114-2119 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.011>

两种先锋植物对铅锌废渣生境改善及重金属迁移的影响

邱静, 吴永贵, 罗有发, 陈然, 郑志林, 周佳佳

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 798-806 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0752>

岷江下游11种杂草对重金属的富集特征

简毅, 张健, 杨万勤, 林静

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2063-2069 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.004>

不同钝化剂对重金属在土壤-油菜中迁移的影响

沈章军, 侯万青, 徐德聪, 吴江峰, 季涛涛

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2779-2788 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0397>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Qing, DING Zi-wei, SUN Qing-ye, 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.



开放科学 OSID

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

(安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601)

摘要:为了探究不同客土改良方式对尾矿修复的效果,将香根草盆栽试验分别在尾矿掺土(掺土10%和20%)和覆土(覆土5 cm和10 cm)改良条件下进行,并对改良后基质的性质以及植物的生理生态特征和重金属含量进行测定。结果表明:客土加入铜尾矿后,提高了基质营养元素含量,降低了有效态重金属含量(Mn、Cu、Zn、Cd和Pb),改善了铜尾矿基质环境。客土改良后,香根草生物量和光合色素含量都出现不同程度提高,其中覆土10 cm对促进植物生长的作用效果最显著。同时,4种改良方式都能降低植物体中MDA含量和抗氧化酶(SOD、CAT和POD)活性,有效缓解重金属的生物毒性。两种掺土改良处理对香根草体内重金属含量没有较大影响,覆土改良促进了植物根对重金属的吸收,香根草根Mn、Cu、Zn、Cd和Pb含量在覆土10 cm处理中分别比对照(不加土壤的铜尾矿)增加104.71%、47.47%、103.13%、61.54%和47.82%,掺土改良不改变香根草体内重金属的转运特征,香根草仍将重金属积累在根部以维持较高的重金属抗性,覆土改良可以增加香根草根重金属的富集,有效固定尾矿中的重金属。研究表明,客土改良方式能够有效改善铜尾矿理化性质,促进植物生长,缓解重金属胁迫。

关键词:铜尾矿;客土改良;香根草;生理特征;重金属

中图分类号:X173;X753 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)01-0083-09 doi:10.11654/jaes.2020-0902

Effects of alien soil improvement of copper tailings on physiological characteristics and heavy metals uptake of *Vetiveria zizanioides*

FANG Qing, DING Zi-wei, SUN Qing-ye*, WANG Ning

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to explore the effect of different alien soil improvement methods on the rehabilitation of tailings, a pot experiment of *Vetiveria zizanioides* was carried out under improved conditions of soil-mixing treatment (mixing 10% and 20% soil) and soil-covering treatment (covering with 5 cm and 10 cm soil), and the properties of the improved matrix, physio-ecological characteristics, and heavy metals content of plant were determined. Results showed that the application of alien soil increased the content of matrix nutrition elements and decreased the content of available heavy metals (Mn, Cu, Zn, Cd, and Pb), improving the matrix environment of copper tailings. The biomass and photosynthetic pigment content of *V. zizanioides* increased to different degrees after alien soil improvement. The most significant effect of promoting plant growth was observed in 10 cm soil-covering treatment. Moreover, the content of malondialdehyde (MDA) and activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD) in the plant decreased in all the four improved methods, effectively alleviating the biological toxicity of heavy metals. The two soil-mixing treatments had little effect on the heavy metals content of *V. zizanioides*, whereas soil-covering treatment promoted heavy metals absorption by plant roots. Compared with the control, 10 cm soil-covering treatment increased the Mn, Cu, Zn, Cd, and Pb content of *V. zizanioides* roots by

收稿日期:2020-08-01 录用日期:2020-09-09

作者简介:方青(1995—),女,安徽安庆人,硕士研究生,从事生态工程与环境修复技术研究。E-mail:fangqing1226@hotmail.com

*通信作者:孙庆业 E-mail:sunqingye@ahu.edu.cn

基金项目:安徽省农业生态环保与质量安全产业技术体系专项(AHCYJSTX-15)

Project supported: The Major Program for Anhui Agricultural Ecological Environmental Protection and Quality Safety Industrial Technology System (AHCYJSTX-15)

104.71%, 47.47%, 103.13%, 61.54%, and 47.82%, respectively. Soil-mixing treatment did not alter the translocation of heavy metals in *V. zizanioides*; heavy metals were still accumulated in the roots to maintain high plant-resistance. Soil-covering treatment can increase the accumulation of heavy metals in *V. zizanioides* roots and effectively fix heavy metals in tailings. The alien soil-improving measures of this study can improve the physicochemical properties of copper tailings, promote plant growth, and relieve heavy metals stress.

Keywords: copper tailings; alien soil-improving; *Vetiveria zizanioides*; physiological characteristics; heavy metals

铜陵矿产资源开采历史悠久,矿业开采过程中产生的尾矿占用了大量的土地资源,长期的风蚀和雨水淋溶导致尾矿中锰(Mn)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)等重金属污染了当地农田和地下水,引起了一系列环境问题,因此对该地区尾矿的修复和治理具有十分重要的现实意义^[1-2]。

尾矿的极端养分贫瘠和结构不良对其修复和治理有很大的限制作用^[3-4]。为改善基质的理化性质、促进复垦植被生长,一般需要对尾矿基质进行改良,其中客土改良作为一种常用的工程措施,在重金属污染土壤和盐碱土壤等养分贫瘠土壤的改良中均产生了良好的效果^[5-6]。Zhang等^[7]通过分析铅锌尾矿重金属在不同覆土条件下的迁移得出,表土可以将水分保持在土壤中防止其下渗,减少重金属的迁移。魏忠义等^[8]通过研究淋滤条件下覆土措施对重金属纵向迁移的结果表明,尾矿层重金属含量显著减少,覆土层可交换态重金属含量也基本小于原覆土值。此外,覆土可以增加矿区土壤中的全氮含量和养分供给,调节表层土壤基质容重,形成有利于植被生长的土壤物理结构^[9]。张宝娟等^[10]研究发现铁尾矿掺土对提高速效养分含量作用明显,能够促进油松和樟子松的生长。然而,现实中尾矿库覆土一般为50~100 cm,并且,现有研究中尾矿覆土厚度也都在50 cm以上,这在施工成本和土源获取上都是亟待解决的难题,而且客土量超过一定范围后,尾矿废弃地修复效果增长不显著。合适的覆土厚度需要根据植物类型调整,在尾矿生态修复过程中,香根草(*Vetiveria zizanioides*)因具有生长迅速、根系发达、生物量大、耐重金属性强等特点而得

到广泛应用^[11-13],其根在野外条件可延伸2~3 m。同时,大量研究证实香根草对尾矿中Cu^[14]、Zn^[15-16]和Pb^[15,17]等重金属的吸收都有十分重要的作用。

基于此,本研究拟在客土量较小的情况下对铜尾矿进行客土改良,通过对香根草生理特征和其重金属含量的测定,明确客土改良作用于尾矿生态修复的特性以及对修复植物的生理特征及重金属含量的作用机制,为实现经济高效的尾矿生态修复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验方法

铜尾矿选自铜陵铜官山水木冲铜尾矿库(30°56'11"N,117°51'35"E)。改良所用土壤选自安徽大学校园内菜园土(31°47'29"N,117°11'40"E),土壤为重壤土,其中砂质成分37.5%、黏土成分62.5%。将两者均过1 cm×1 cm筛网,其基本理化性质和重金属含量见表1。对照组为不加土壤的铜尾矿(CK),客土改良方式分为4种(表2):其中两种为掺土处理,即在尾矿中按质量比分别掺土10%和20%(C10和C20);另两种为覆土处理,即在尾矿上分别覆盖5 cm和10 cm土(F5和F10)。从野外获取的香根草在温室中驯化一个月后,选取生长一致无污染的幼苗种植于花盆(直径和高度均为27 cm)中,根系集中在基质表层5 cm范围内,每盆3株,每种处理设4次重复。所有盆栽均在室外培养,施加适量N-P₂O₅-K₂O(15-15-15)复合肥,并保证采光、浇水量一致,植物之间无遮挡,保持植物正常生长,定期监测植物生长情况,种植试

表1 基质基本理化性质和重金属含量(平均值,n=4)

Table 1 Basic physicochemical properties and heavy metals content of matrix (Mean, n=4)

基质 Matrix	pH	电导率 Electric conductivity/ (μS·cm ⁻¹)	总氮 Total nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	总磷 Total phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	总钾 Total potassium/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	重金属 Heavy metals/(mg·kg ⁻¹)				
								Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
铜尾矿 Copper tailings	7.18	712	262	170	926	2.23	0.39	2 463	447	670	2.47	28.7
土壤 Soil	7.71	1 823	765	1 331	1 774	56.20	72.70	314	21.5	4 838	0.24	25.4

表2 基质配比和质量

Table 2 Matrix ratio and mass

处理 Treatments	基质配比 Matrix ratio	土壤质量 Soil mass/kg	铜尾矿质量 Copper tailings mass/kg	基质总质量 Total matrix mass/kg
CK	铜尾矿	0	12.0	12.0
C10	90% 铜尾矿+10% 土壤	1.2	10.8	12.0
C20	80% 铜尾矿+20% 土壤	2.4	9.6	12.0
F5	覆土 5 cm	2.0	10.0	12.0
F10	覆土 10 cm	5.0	7.0	12.0

验持续 60 d。

1.2 样品采集与预处理

采集香根草茎叶和尾矿样品。每盆各采集 3 株香根草完全展开叶 3~4 片,装入无菌塑料袋中;对应采集植株根周围尾矿样品,抖落附着在植株根部的尾矿,同时刷取根际尾矿,将 3 个尾矿样品混匀后装入无菌塑料袋中。植株样品和尾矿样品各 20 份。

植物样品立即带回试验室后用自来水和超纯水冲洗,擦干,用陶瓷剪刀剪碎混匀。一部分保存于-70℃超低温冰箱中,用于生理生化指标的测定;另一部分置于 105℃条件下杀青 30 min,再于 70℃条件下烘干至恒质量,磨碎,置于自封袋中保存,用于植物重金属含量测定。尾矿样品在通风处自然风干,用玛瑙研钵研磨,过筛后装于自封袋中保存,用于尾矿中重金属总量和有效态含量的测定。

1.3 样品分析

称取 10.0 g 基质样品与 25 mL 蒸馏水振荡混匀后静置 30 min,使用雷磁 PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)和雷磁 DDB-303A 电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)分别测定 pH 和电导率。基质氮、磷和钾含量的测定参考文献[18]的方法。基质重金属(Mn、Cu、Zn、Cd、Pb)总量、植物重金属(Mn、Cu、Zn、Cd、Pb)含量分别采用硝酸-氢氟酸消解和硝酸消解法,基质可提取态重金属含量采用 DTPA 提取,再用电感耦合等离子体质谱仪(ICAPQ, Thermo Fisher, 美国)测定,测定过程中用土壤环境标准物质(GSS-15)和植物环境标准参考样品(GBW10020、GBW10048)进行质量控制,以保证数据的准确度和精度,各元素的加标回收率在 91%~105%,符合元素分析质量控制标准。

香根草超氧化物歧化酶(SOD)活性利用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[19]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[19]测定;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法^[19]测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[19]测定;叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素用丙酮提取

测定^[20]。

1.4 数据处理及分析

转移系数(Translocation factor, TF)表示植物对重金属的转移能力:

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}}$$

式中: C_{shoot} 、 C_{root} 分别代表植物地上部分和根中特定重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$ 。

采用 SPSS 20.0 对数据进行平均值、标准差、ANOVA、Duncan 多重比较和 Pearson 相关分析,用 Origin 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 客土改良对铜尾矿理化性质和有效态重金属含量的影响

客土改良条件下,尾矿砂 pH 基本保持稳定,而电导率出现不同程度上升(表 3)。掺土和覆土都能显著提高铜尾矿营养元素(N、P、K)含量($P < 0.05$),且表现为覆土处理优于掺土处理,F10 中尾矿总氮、总磷、总钾、速效磷和速效钾含量分别比 CK 高 15.04%、36.53%、16.45%、426.55% 和 735.89%。

由表 4 可以看出,客土改良情况下有效态重金属(DTPA 提取态)含量都有所降低。掺土处理对有效态重金属含量的影响较小,仅在 C20 中有效态 Mn、Cu 和 Zn 显著低于 CK($P < 0.05$);在覆土处理组,有效态重金属含量除 F5 处理中的 Cu 外,其余均显著低于 CK($P < 0.05$),有效态重金属含量在两种覆土处理间无显著差异(Cu 除外),但在 F10 中有效态 Mn、Cu、Zn 和 Cd 都达到最低;C20 和 F5 处理中土壤含量分别为 20% 和 17%,但 F5 处理中有效态 Mn、Zn、Cd、Pb 含量均低于 C20 处理。

2.2 客土改良对香根草生长和生理特征的影响

本研究中,香根草生物量在 C10、C20、F5 和 F10 4 种改良方式中分别比 CK 高 19.42%、25.24%、72.57% 和 126.06%(表 5)。叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素

表3 客土改良对铜尾矿理化性质的影响(平均值±标准差,n=4)

Table 3 Effects of alien soil-improving on physicochemical properties of copper tailings (Mean±SD,n=4)

处理 Treatments	pH	电导率 Electric conductivity/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	总氮 Total nitrogen/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总磷 Total phosphorus/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总钾 Total potassium/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	7.12±0.01a	706.12±2.96d	266.32±4.21d	167.15±5.48e	925.46±4.99e	2.26±0.18e	0.392±0.002d
C10	7.14±0.01a	724.27±2.46c	273.34±3.80c	176.28±4.77d	953.23±17.60d	2.43±0.07d	0.434±0.002d
C20	7.14±0.01a	730.21±2.03bc	284.07±5.87b	186.26±3.36c	981.32±6.37c	4.78±0.12c	1.270±0.013c
F5	7.13±0.03a	735.29±4.41b	289.20±7.52b	194.38±5.03b	1 030.19±16.90b	5.25±0.33b	1.832±0.006b
F10	7.15±0.02a	753.38±7.69a	307.32±3.68a	228.34±6.91a	1 077.21±8.73a	11.90±0.65a	3.260±0.025a

注:同列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

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

表4 客土改良下铜尾矿有效态重金属含量(平均值±标准差,n=4; $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Available heavy metals content in copper tailings under alien soil-improving (Mean±SD,n=4; $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	1 737.4±65.5a	299.4±23.4a	481.2±21.9a	2.03±0.14a	21.6±1.4a
C10	1 656.4±46.7ab	299.3±16.0a	469.3±16.4ab	2.00±0.13a	19.6±2.1ab
C20	1 607.2±93.6bc	256.3±6.0b	450.2±23.2bc	1.89±0.13ab	20.1±0.9ab
F5	1 544.2±29.8cd	297.2±13.8a	434.3±12.9cd	1.76±0.08bc	18.6±1.3b
F10	1 512.3±8.6d	227.1±8.7c	412.3±7.5d	1.66±0.06c	19.4±0.6b

含量在改良基质中也均有不同程度的提高,但仅在F10处理中达到显著水平($P<0.05$)。

客土改良后,香根草体内MDA含量较CK降低11.21%~25.23%,SOD、CAT和POD活性出现不同程度下降(图1)。在F10处理组中,SOD、CAT和POD酶活性均显著低于CK($P<0.05$),分别比CK低35.80%、38.89%和29.25%,C10处理中3种酶活性与CK无显著差异。

2.3 客土改良对香根草体内重金属含量的影响

与CK相比,客土改良显著提高香根草根中各重金属含量(除C10外),对地上部重金属含量增加并不显著(图2)。两种掺土处理中,香根草根Mn、Cu、Zn和Pb含量随掺土量的增加而显著增加($P<0.05$),但其地上部重金属含量无显著差异。不同于掺土处理,覆土处理中植物根中各重金属含量显著高于CK($P<0.05$),并且F10显著高于F5(除Cu外),同时,覆土处理中香根草地上部Mn和Pb含量也显著高于CK($P<0.05$)。

重金属转移系数的分析表明(表6):香根草中5种重金属的转移系数在不同改良条件下均小于1,客土改良后重金属的转移系数与CK差异不显著,仅在F10中,Mn的转移系数显著高于CK($P<0.05$)。

2.4 Pearson 相关性分析

植物生理特征和有效态重金属的相关分析表明

(表7):香根草生物量与尾矿中有效态Mn含量呈显著($P<0.05$)负相关,与有效态Zn和Cd含量呈极显著($P<0.01$)负相关(相关系数分别为-0.962和-0.967)。香根草叶绿素a和叶绿素b含量与尾矿中有效态Cu含量呈显著负相关($P<0.05$)。SOD活性与有效态Zn和Cd含量呈显著正相关($P<0.05$),POD活性与有效态Mn含量呈显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论

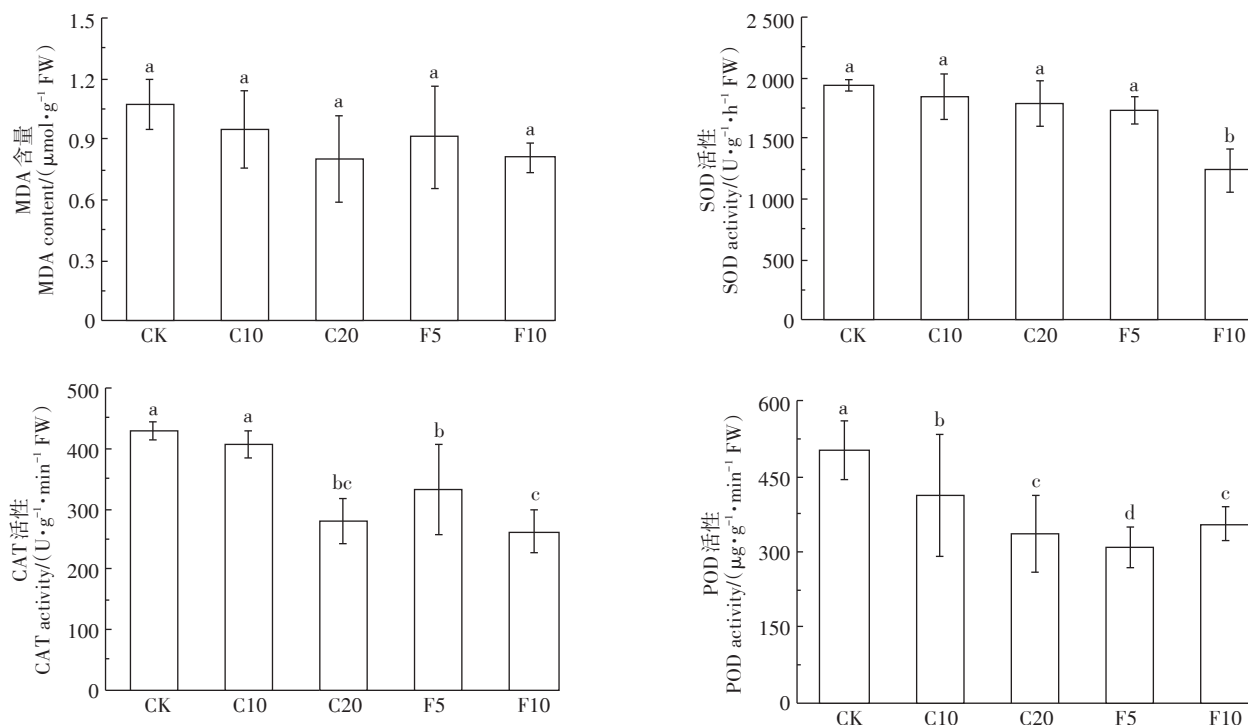
客土改良能显著改善铜尾矿极端养分贫瘠状态,使尾矿基质得到一定程度改良。这与鲁统春等^[21]发现客土改良能快速恢复废弃地土壤理化性质的研究结果一致,陈怀满等^[22]对德兴铜矿区客土改良后也得

表5 客土改良下香根草生物量和光合色素含量

(平均值±标准差,n=4)

Table 5 Biomass and photosynthetic pigment contents of *Vetiveria zizanioides* by alien soil-improving (Mean±SD,n=4)

处理 Treatments	生物量 Biomass/g	叶绿素a Chlorophyll a/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶绿素b Chlorophyll b/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	类胡萝卜素 Carotenoid/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	16.8±2.0d	344.3±37.3b	121.2±8.5b	67.6±8.5b
C10	20.1±3.0cd	420.2±97.1b	119.3±29.9b	87.4±15.1ab
C20	21.1±1.4c	469.4±135.0b	149.4±41.9b	87.3±32.1ab
F5	29.1±3.1b	398.2±41.3b	142.0±11.8b	77.0±14.0ab
F10	38.1±1.7a	857.3±268.1a	305.2±93.1a	114.3±41.7a



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

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

图1 客土改良下香根草丙二醛含量和抗氧化酶活性

Figure 1 Malondialdehyde content and antioxidant enzymes activities of *Vetiveria zizanioides* by alien soil-improving

表6 客土改良下香根草各重金属元素的转移系数(平均值±标准差, $n=4$)

Table 6 Translocation factor of each heavy metal element of *Vetiveria zizanioides* by alien soil-improving (Mean±SD, $n=4$)

处理 Treatments	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
CK	0.548±0.033b	0.080±0.016a	0.426±0.035a	0.456±0.061a	0.160±0.013a
C10	0.552±0.105b	0.092±0.014a	0.404±0.045a	0.421±0.129a	0.180±0.015a
C20	0.551±0.080b	0.129±0.005a	0.355±0.075a	0.456±0.076a	0.248±0.105a
F5	0.627±0.100b	0.079±0.013a	0.440±0.055a	0.383±0.053a	0.220±0.042a
F10	0.876±0.067a	0.076±0.073a	0.429±0.064a	0.475±0.145a	0.218±0.031a

出类似结果。合适的客土改良能降低尾矿中有效态重金属含量。本研究中,客土用量和客土加入方式对降低尾矿有效态重金属含量都有影响。在4种改良方式中,F10处理对降低尾矿中有效态重金属含量最有利。土壤中含有许多有机物和无机物,客土改良降低基质重金属有效性可能源于土壤中的有机质和无机物(二氧化硅、氧化铝、氧化镁)产生重金属吸附、络合和离子交换作用^[23],从而导致有效态重金属含量降低。

生物量和光合色素含量可以反映植物生长情况。不同客土改良方式对提高香根草生物量和光合色素含量都有积极影响,这可能与基质中重金属含量有关。诸多研究发现,植物光合色素在重金属胁迫下会明显下降^[24-25]。相关分析表明,香根草叶绿素含量与

基质有效态Cu含量呈显著负相关,较高浓度的Cu在早期会破坏植物的叶绿体结构,降低植物叶片的光合作用^[26]。添加客土可以稀释尾矿中的重金属,此外,覆土处理在尾矿上重新构建一个未受污染的表层,有效缓解了重金属对植物的胁迫,促进植物生长。

植物在重金属胁迫下,膜脂过氧化程度增加,进而破坏植物细胞膜结构,MDA是膜脂过氧化的重要产物,其含量可以反映细胞膜受损的程度^[27]。在一定的重金属浓度范围内,植物体会产生一些抗氧化酶,以此清除重金属胁迫产生的活性氧(O_2^-),SOD、CAT和POD是植物体内重要的抗氧化酶,可将活性氧最终转化为 H_2O 和 O_2 ,减轻重金属胁迫^[28-30]。研究结果表明客土改良减轻了香根草的氧化损害,其抗氧化酶

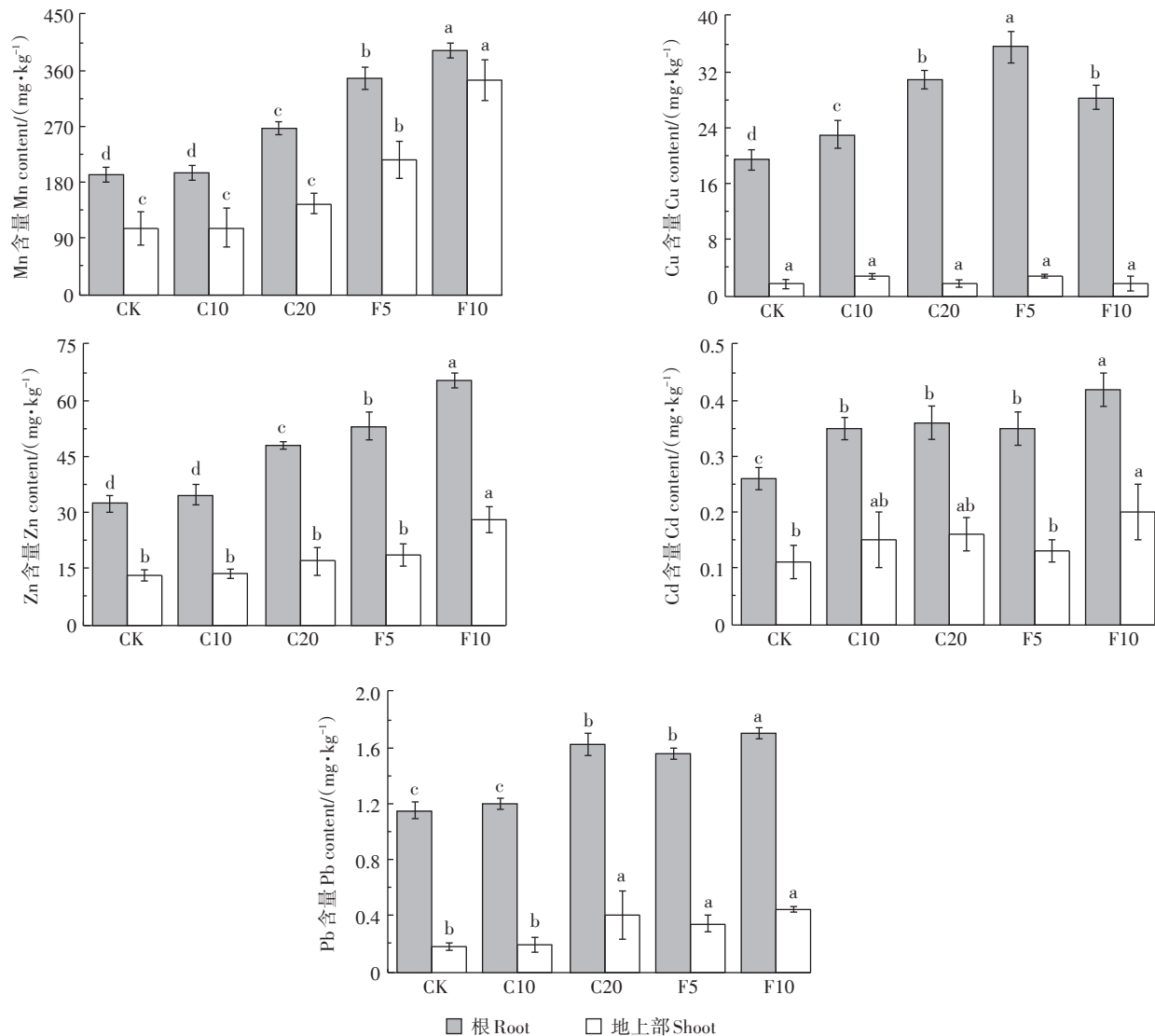


图2 客土改良下香根草体内重金属含量

Figure 2 Heavy metals contents of *Vetiveria zizanioides* by alien soil-improving

表7 香根草生理特征与尾矿有效态重金属含量的 Pearson 相关性分析

Table 7 Pearson correlation analysis on physiological characters of *Vetiveria zizanioides* with available heavy metals contents of tailings

指标 Index	生物量 Biomass	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	MDA	SOD	CAT	POD
Mn	-0.910*	-0.700	-0.706	-0.703	0.813	0.811	0.853	0.882*
Cu	-0.693	-0.904*	-0.889*	-0.865	0.802	0.840	0.869	0.420
Zn	-0.962**	-0.806	-0.831	-0.756	0.783	0.900*	0.878	0.777
Cd	-0.967**	-0.770	-0.815	-0.690	0.710	0.884*	0.836	0.746
Pb	-0.624	-0.253	-0.234	-0.340	0.423	0.416	0.357	0.757

注: *. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$.Note: *. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$.

系统还在未完全启动状态^[31-32]。SOD 活性与基质有效态 Zn 和 Cd 含量呈显著正相关, POD 活性与有效态 Mn 含量呈显著正相关, 客土改良对尾矿中重金属的稀释作用(表4)是导致香根草中抗氧化酶在不同基

质中产生差异的一个重要因素, 基质中重金属含量增加会诱导植物产生一系列抗氧化剂和渗透性保护物质, 以此清除活性氧物质, 共同抵御外界胁迫^[33]。在 F10 处理组中, 植物中抗氧化酶活性最低, 这可能是

由于覆土较厚,导致尾矿中的重金属在向植物根系迁移时被土壤中的多孔颗粒吸附沉淀在土壤中,也可能是植物生长较好进而通过其他机制协同抗氧化酶共同抵御重金属胁迫。

有研究表明,客土改良能够降低污染土壤中有效态重金属含量,通过钝化重金属防止其被植物吸收^[34]。本研究结果显示客土改良降低尾矿中有效态重金属含量(表4),但是植物体内重金属含量在改良条件下都有所增加,这和香根草的生长情况表现出一致性,客土改良条件下生长的香根草通过分泌一些代谢产物活化尾矿中的重金属,活化后的重金属被香根草过量吸收。张淑香等^[35]研究发现,作物根系分泌的脂肪酸在根际环境积累会造成局部土壤酸性环境,从而促进土壤中重金属的溶解和根系的吸收。此外,一些植物还能在缺铁条件下释放植物高铁载体^[36],促进重金属溶解。李文一^[37]研究证实,香根草分泌的根系分泌物可以活化难溶性Zn、Cd。因此出现尾矿中有效态重金属含量降低而香根草中重金属含量增高的结果。张永兰等^[38]对铜尾矿客土改良后也发现,种植黑麦草显著增加基质中有效态Cu含量,这说明黑麦草的生长促进了基质中Cu的形态转化。王亚男等^[39]在重金属盐渍化土壤中施用EDTA后,发现土壤中有效态Cd含量降低,而盐地碱蓬中Cd积累量却增加。何其辉等^[40]也发现施用紫云英显著降低土壤中有效态Cd含量,而增加水稻根和秸秆的Cd含量。此外,客土加入方式不同也会造成植物对重金属的吸附差异,F5和C20两种处理中基质配比接近,但F5对应的植物根中Mn、Cu和Zn含量显著高于C20,这说明覆土较掺土更有利于香根草根对重金属的富集,尾矿掺土增大了尾矿和土壤颗粒的接触面积,土壤中的有机物和无机物与尾矿中的重金属离子充分吸附络合,降低了重金属的生物有效性,从而影响植物对重金属的吸收。并且,在两种覆土处理中,F10处理条件下香根草的重金属含量均显著高于F5处理(Cu和Pb地上部分除外),这可能是由于覆土厚度增加,使植物根系在土壤中的部分增多,相较于养分贫瘠的尾矿砂,植物根系能吸收更多的养分,而香根草的根有很强的穿透力且对重金属的吸收主要依靠发达的根系。王锐等^[9]对高寒矿区植被恢复的研究也得出一致的结果。本研究的客土改良方式对香根草转运重金属没有较大影响,香根草仍可通过限制重金属向地上部分运输来降低重金属对地上部分的伤害,维持了较高的重金属耐性。但在F10处理中,Mn的转移系数显著

高于CK,这表明该处理能显著提高Mn向茎叶的转移,原因可能是香根草对重金属的选择吸收以及重金属在不同基质中的扩散能力不同,具体机制还需进行更深入的研究。

利用覆土改良和植物修复技术可以改善尾矿库环境,促进其生态恢复,但重金属的生物富集性会导致其通过生物链转移,植物中的重金属会转移到植食性动物中,从而直接或间接危害人类健康,因此,需要定期收割植物集中处理,移除尾矿中的重金属。

4 结论

(1)客土改良能改善铜尾矿基质环境,提高营养元素(N、P、K)含量,降低有效态Mn、Cu、Zn、Cd、Pb含量。

(2)客土改良条件下,香根草生物量增加,MDA含量和抗氧化酶(SOD、CAT和POD)活性降低,说明客土改良可以缓解重金属对香根草的氧化伤害,促进铜尾矿中香根草生长,尤其是覆土10 cm时作用效果最显著。

(3)掺土改良不改变香根草体内重金属的转运,覆土改良可以促进香根草根对Mn、Cu、Zn、Cd和Pb的富集,覆土10 cm条件下,香根草体内重金属含量显著增加。

参考文献:

- [1] 林海,江昕昞,李冰,等. 有色金属尾矿植物修复强化技术研究进展[J]. 有色金属工程, 2019, 9(11): 122-132. LIN Hai, JIANG Xin-yi, LI Bing, et al. Research progress on strengthening technology for phytoremediation[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(11): 122-132.
- [2] 胡星明,袁新松. 铜陵尾矿土壤重金属污染物的固定修复[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1378-1382. HU Xing-ming, YUAN Xin-song. In-situ remediation of mine tailing soil contaminated by heavy metals in Tongling City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(11): 1378-1382.
- [3] Siyar R, Doulati A F, Farahbakhsh M, et al. Potential of vetiver grass for the phytoremediation of a real multi-contaminated soil, assisted by electrokinetic[J]. *Chemosphere*, 2020, 246: 125802.
- [4] 束文圣,叶志鸿,张志权,等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639. SHU Wen-sheng, YE Zhi-hong, ZHANG Zhi-quan, et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in south China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1629-1639.
- [5] 谷金锋,蔡业久,杨业. 高寒山区采矿迹地植被恢复研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 29-36. GU Jin-feng, CAI Ti-jiu, YANG Ye. Research on vegetation restoration of abandoned mine land in alpine areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 29-36.

- [6] 孙永秀, 严成, 徐海量, 等. 受损矿区草原群落物种多样性和地上生物量对覆土厚度的响应[J]. 草业学报, 2017, 26(1): 54-62. SUN Yong-xiu, YAN Cheng, XU Hai-liang, et al. Grassland community species diversity and aboveground biomass responses to difference in cover soil thickness in restoration after mining damage[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(1): 54-62.
- [7] Zhang W, Alakangas L, Wei Z, et al. Geochemical evaluation of heavy metal migration in Pb-Zn tailings covered by different topsoils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 165: 134-142.
- [8] 魏忠义, 胡塔娜, 汪建, 等. 表层构造措施对铜矿尾矿重金属纵向迁移的影响[J]. 中国矿业, 2012, 21(7): 53-56. WEI Zhong-yi, HU Ta-na, WANG Jian, et al. Effect of surface reconstruction on vertical migration of heavy metals in the copper tailing pond[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(7): 53-56.
- [9] 王锐, 李希来, 张静, 等. 不同覆土处理对青海木里煤田排土场渣山表层土壤基质特征的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1266-1275. WANG Rui, LI Xi-lai, ZHANG Jing, et al. Effects of different soil-covering thicknesses on the characteristics of coalmine spoils in the Muli coalfield of Qinghai Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(5): 1266-1275.
- [10] 张宝娟, 郭耸松, 李继泉, 等. 掺土和施肥对铁尾矿基质理化性质及油松、樟子松幼苗生长的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(5): 12-20. ZHANG Bao-juan, GUO Song-song, LI Ji-quan, et al. Effects of mixing soil and applying fertilizer measures on physicochemical properties of iron tailings and growth of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(5): 12-20.
- [11] Marques A P, Rangel A O, Castro P M, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science Technology*, 2009, 39(8): 622-654.
- [12] 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.
- [13] Xu W H, Li W Y, He J P, et al. Effects of insoluble Zn, Cd, and EDTA on the growth, activities of antioxidant enzymes and uptake of Zn and Cd in *Vetiveria zizanioides*[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 186-192.
- [14] Das M, Maiti S K. Growth of *Cymbopogon citratus* and *Vetiveria zizanioides* on Cu mine tailings amended with chicken manure and manure-soil mixtures: A pot scale study[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(8): 651-663.
- [15] Chiu K K, Ye Z H, Wong M H. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study[J]. *Biore-source Technology*, 2006, 97(1): 158-170.
- [16] Pang J Y, Chan G S Y, Zhang J H, et al. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1559-1570.
- [17] Meeinkuirt W, Kruatrachue M, Tanhan P, et al. Phytostabilization Potential of Pb mine tailings by two grass species, *Thysanolaena maxima* and *Vetiveria zizanioides*[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2013, 224(10): 1750.
- [18] 王友保, 张莉, 沈章军, 等. 铜尾矿库区土壤与植物中重金属形态分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2418-2422. WANG You-bao, ZHANG Li, SHEN Zhang-jun, et al. Chemical forms of heavy metals in the soils and plants of copper tailings yard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2418-2422.
- [19] Liu S L, Yang R J, Pan Y Z, et al. Exogenous NO depletes Cd-induced toxicity by eliminating oxidative damage, re-establishing ATPase activity, and maintaining stress-related hormone equilibrium in white clover plants[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(21): 16843-16856.
- [20] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, 24: 1-15.
- [21] 鲁统春, 高德武, 王创争, 等. 废弃采石场植被快速恢复研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 210-212. LU Tong-chun, GAO De-wu, WANG Chuang-zheng, et al. Study on the rapid vegetation of abandoned quarries[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6): 210-212.
- [22] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 德兴铜矿尾矿库植被重建后的土壤肥力状况和重金属污染初探[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 29-36. CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Changes in soil fertility and extractable heavy metals in Dexing copper mine tailing pool after revegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 29-36.
- [23] Zhang M, Pu J. Mineral materials as feasible amendments to stabilize heavy metals in polluted urban soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(4): 607-615.
- [24] Emamverdian A, Ding Y L, Mokherdoram F, et al. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response[J]. *The Scientific World Journal*, 2015. doi: 10. 1155/2015/756120.
- [25] Macfarlane G R, Burchett M D. Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy metal stress in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.[J]. *Marine pollution bulletin*, 2001, 42(3): 233-240.
- [26] 冯汉青, 张牡丹, 陈永霞, 等. Cu胁迫下水杨酸对当归幼苗叶绿素含量和荧光特性影响的研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 83-88. FENG Han-qing, ZHANG Mu-dan, CHEN Yong-xia, et al. Effect of salicylic acid on chlorophyll content and fluorescence characteristics of *Angelica sinensis* seedlings under Cu stress[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(1): 83-88.
- [27] 努扎艾提·艾比布, 刘云国, 宋华晓, 等. 重金属 Zn Cu 对香根草生理生化指标的影响及其积累特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 54-59. NUZA' AITI·Aibibu, LIU Yun-guo, SONG Hua-xiao, et al. Effects of Zn and Cu on physiological and biochemical processes and their accumulation characteristics of vetiver[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 54-59.
- [28] Andra S S, Datta R, Reddy R, et al. Antioxidant enzymes response in vetiver grass: A greenhouse study for chelant-assisted phytoremediation

- tion of lead-contaminated residential soils[J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2011, 39(5):428-436.
- [29] Gill S S, Khan N A, Anjum N A, et al. Amelioration of cadmium stress in crop plants by nutrients management: Morphological, physiological and biochemical aspects[J]. *Plant Stress*, 2011, 5(1):1-23.
- [30] Panda S K, Chaudhury I, Khan M H. Heavy metals induce lipid peroxidation and affect antioxidants in wheat leaves[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 46(2):289-294.
- [31] Li X N, Yang Y L, Jia L Y, et al. Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 89:150-157.
- [32] 张家洋. 重金属铅镉短期胁迫对蓬菜蕉生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):340-345. ZHANG Jia-yang. The effect of Pb and Cd on physiological and biochemical indexes of *Monstera Deliciosa* Liebm. in the short-term conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):340-345.
- [33] Malar S, Vikram S S, Favas P J C, et al. Lead heavy metal toxicity induced changes on growth and antioxidative enzymes level in water hyacinths [*Eichhornia crassipes* (Mart.)][J]. *Botanical Studies*, 2016, 55(1):54.
- [34] 汪雅各, 王玮, 卢善玲, 等. 客土改良菜区重金属污染土壤[J]. 上海农业学报, 1990, 6(3):50-55. WANG Ya-ge, WANG Wei, LU Shan-ling, et al. A study on heavy metal-polluted soil improvement by agricultural engineering soil exchange in vegetable growing area[J]. *Acta Agricultural Shanghai*, 1990, 6(3):50-55.
- [35] 张淑香, 高子勤. 连作障碍与根际微生态研究 II. 根系分泌物与酚酸物质[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1):153-157. ZHANG Shu-xiang, GAO Zi-qin. Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology II. Root exudates and phenolic acids[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1):153-157.
- [36] Renella G, Landi L, Nannipieri P. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil[J]. *Geoderma*, 2004, 122(2/3/4):311-315.
- [37] 李文一. 香根草对碱性土壤难溶性锌镉的吸收利用及 EDTA 调控机理[D]. 重庆: 西南大学, 2007:42. LI Wen-yi. Absorption and utilization of *Vetiveria zizanioides* on insoluble Zn and Cd in alkaline soil and regulatory mechanism of EDTA[D]. Chongqing: Southwest University, 2007:42.
- [38] 张永兰, 王友保. 多年生黑麦草对覆土作用下铜尾矿的修复[J]. 草业科学, 2019, 36(1):3-10. ZHANG Yong-lan, WANG You-bao. Restoration of copper tailings under covering soil by perennial ryegrass[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(1):3-10.
- [39] 王亚男, 许静, 郝利君, 等. 修复剂对镉污染盐渍化土壤植物修复效率的影响[J/OL]. 土壤学报:1-12. (2020-04-03)[2020-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200403.1433.006.html>. WANG Ya-nan, XU Jing, HAO Li-jun, et al. Effects of soil remediation agents on the phytoremediation efficiency of cadmium-polluted salinized soil[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*:1-12. (2020-04-03)[2020-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200403.1433.006.html>.
- [40] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5):942-951. HE Qi-hui, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5):942-951.