

蚯蚓对不同pH值土壤中铬赋存及细菌群落的影响特征

王浩羽, 韦杰, 孙进宇, 宋言, 顾强, 宓文海, 居静, 赵海涛, 封克

引用本文:

王浩羽, 韦杰, 孙进宇, 宋言, 顾强, 宓文海, 居静, 赵海涛, 封克. 蚯蚓对不同pH值土壤中铬赋存及细菌群落的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1472-1482.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1260>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓对金霉素污染土壤酶活性和微生物群落的影响

杨思德, 常兴平, 潘政, 李明堂, 翁莉萍, 李永涛, 赵丽霞

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1268-1280 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1470>

不同类型土壤淹水对pH、Eh、Fe及有效态Cd含量的影响

朱丹妹, 刘岩, 张丽, 王秀梅, 安毅, 李玉浸, 林大松

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1508-1517 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1491>

宁夏养鸡场粪污及周边土壤重金属和细菌群落特征研究

张俊华, 贾萍萍, 刘吉利, 孙媛, 尚天浩

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1692-1705 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0303>

蚯蚓/改性生物炭对As污染红壤的稳定化效应

苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 黄晓雅

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 999-1007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1114>

赤子爱胜蚓对乙草胺污染土壤微生物群落的影响

郝月崎, 孙扬, 李晓晶, 周斌, 翁莉萍, 李永涛, 赵丽霞

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2456-2466 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0504>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王浩羽, 韦杰, 孙进宇, 等. 蚯蚓对不同pH值土壤中铬赋存及细菌群落的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1472–1482.

WANG H Y, WEI J, SUN J Y, et al. Effects of earthworms on the occurrence of chromium and bacterial communities in soils with different pH values[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1472–1482.



开放科学 OSID

蚯蚓对不同pH值土壤中铬赋存及细菌群落的影响特征

王浩羽^{1,2,3}, 韦杰^{1,2,3}, 孙进宇^{1,2,3}, 宋言^{1,2,3}, 顾强^{1,2,3}, 宓文海^{1,2,3}, 居静^{1,2,3}, 赵海涛^{1,2,3*}, 封克^{1,2,3}

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省扬州农业环境安全技术服务中心, 江苏 扬州 225127; 3.农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 江苏 扬州 225127)

摘要:为明确蚯蚓活动对不同酸碱性土壤中铬(Cr)赋存和细菌群落的影响,采用控制试验探究了赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)对不同酸碱性(酸性 pH 5.88、中性 pH 7.55、碱性 pH 8.97)、不同 Cr 含量(15 mg kg⁻¹和 50 mg kg⁻¹)土壤中 Cr 赋存形态和细菌群落的影响。结果表明:接种蚯蚓后,土壤 pH 值向中性转变,低 Cr 含量土壤的 pH 值变化量大于高 Cr 含量土壤;相比于酸性和碱性土壤,接种蚯蚓后中性土壤中的 Cr 去除率最高,低 Cr 含量中性土壤的 Cr 去除率达 62.74%,高 Cr 含量中性土壤的 Cr 去除率达 37.51%;接种蚯蚓后,土壤中酸可提取态 Cr 的含量显著增加,残渣态 Cr 的含量显著降低;接种蚯蚓提高了酸性土壤中变形菌门的丰度、降低了放线菌门的丰度,提高了中性和碱性土壤中放线菌门的丰度,降低了变形菌门和拟杆菌门的丰度,显著提高了土壤细菌群落的丰度(Chao 指数和 ACE 指数),但显著降低了其多样性(Shannon 指数)。综上,蚯蚓通过摄食和被动扩散作用对中性土壤中 Cr 的富集、移除效果优于对酸性和碱性土壤,接种蚯蚓能够有效提升土壤中 Cr 的生物有效性,改变土壤的细菌群落结构。

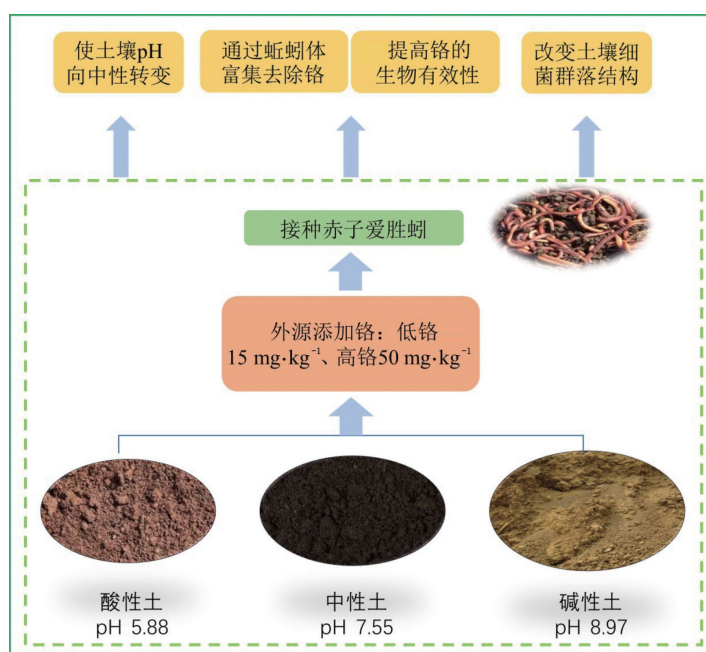
关键词:赤子爱胜蚓;土壤;pH值;铬形态;细菌群落

中图分类号:X53;S154.3

文献标志码:A

文章编号:1672-2043(2022)07-1472-11

doi:10.11654/jaes.2021-1260



Effects of earthworms on the occurrence of chromium and bacterial communities in soils with different pH values

WANG Haoyu^{1,2,3}, WEI Jie^{1,2,3}, SUN Jinyu^{1,2,3}, SONG Yan^{1,2,3}, GU Qiang^{1,2,3}, MI Wenhai^{1,2,3}, JU Jing^{1,2,3}, ZHAO Haitao^{1,2,3*}, FENG Ke^{1,2,3}

收稿日期:2021-11-02 录用日期:2022-02-21

作者简介:王浩羽(1997—),男,江苏张家港人,硕士研究生,主要从事污染土壤修复研究。E-mail:375582274@qq.com

*通信作者:赵海涛 E-mail:htzhao@yzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31000939)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31000939)

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Jiangsu Yangzhou Agricultural Environmental Safety Technology Service Center, Yangzhou 225127, China; 3. Key Laboratory of Cultivated Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou 225127, China)

Abstract: A control experiment was conducted to explore the effects of earthworm (*Eisenia fetida*) activity on Cr occurrence and bacterial communities in soils with different acid-base (acidic, neutral, and alkaline with pH 5.88, 7.55, and 8.97, respectively) and Cr (15 mg·kg⁻¹ and 50 mg·kg⁻¹) levels. The results showed that after the addition of earthworms to acidic soils, the soil pH significantly increased. In neutral and alkaline soils, the soil pH was significantly reduced after consumption by earthworms. Consumption of soil by earthworms led to the pH becoming neutral, and the pH value of low Cr content soil was higher than that of high Cr content soil. Among the acid-base soils, the removal rate of Cr by earthworms was the highest in neutral soil. In neutral soil with a low Cr content, the Cr removal rate was 62.74%, whereas the Cr removal rate was 37.51% in neutral soil with a high Cr content. Earthworm biomass decreased significantly after consuming Cr-contaminated soil with different acidities and alkalinities, and the higher the soil Cr concentration, the greater was the Cr enrichment in earthworms. After consumption by earthworms, the content of acid-extractable Cr in the soil increased significantly at all pH values, and the residual Cr content was reduced dramatically; earthworms had the best effect on activating Cr in acidic soil. After consumption by earthworms, the abundance of Proteobacteria was increased in acidic soils, whereas that of Actinomycetes reduced. In contrast, the abundance of Actinomycetes increased in neutral and alkaline soils and that of Proteobacteria and Bacteroidetes reduced. Furthermore, the abundance of soil bacterial communities (Chao and ACE indices) was significantly increased and the diversity (Shannon index) significantly reduced. In summary, earthworms enriched and removed Cr in neutral soils through feeding and passive diffusion, and these effects were better than those in acidic and alkaline soils. Incorporating earthworms into the soil can effectively improve the bioavailability of Cr and change the bacterial community structure of the soil.

Keywords: *Eisenia fetida*; soil; pH value; chromium form; bacterial community

土壤铬(Cr)污染对农业的破坏和对动植物的不利影响日益加剧^[1],Cr中毒会抑制植物生长^[2],引起动物器官功能障碍^[3],导致人类哮喘、皮炎,甚至癌症等疾病^[4]。因此,土壤中Cr的迁移和转化始终被广泛关注。

蚯蚓被誉为陆地生态系统的“工程师”^[5],其可以通过摄食和被动扩散作用富集土壤重金属^[6],对评估土壤污染物毒性具有重要的生态毒理学意义^[7]。重金属污染的土壤会对蚯蚓产生氧化胁迫,导致其出现应激反应,并且蚯蚓会通过改变自身功能酶活性和环境微生物群落结构来响应环境毒性^[8-9]。蚯蚓的取食活动有助于增强土壤微生物的活性和数量,并改变微生物种群结构特征^[10]。接种蚯蚓对不同酸碱性土壤中土壤微生物菌群结构影响较大,可将与金属迁移转化相关的菌群转变为优势菌群^[11]。微生物能够将重金属离子吸附在其细胞壁表面,同时还可以通过氧化-还原作用、甲基化作用和脱羟作用,将重金属离子转化为其他化合物形式^[12-13]。土壤重金属分为酸可提取态、可还原态、可氧化态以及残渣态4种,酸可提取态重金属生物有效性较高,可还原态和可氧化态重金属生物有效性较低,残渣态重金属为潜在不流动部分^[14]。土壤pH值显著影响重金属赋存形态,特别是可交换态的赋存特征^[15]。蚯蚓能够改变土壤中重金属的赋存环境与赋存特征,继而改变重金属的生物

有效性^[16-17]。研究表明,蚯蚓的活动能够改变土壤pH值^[18-19],提高土壤中腐殖质和有机酸含量,从而引起金属元素移动性发生改变^[20]。也有研究发现蚯蚓可以分泌并释放出一COOH和一CO等化学基团激活重金属^[21],同时排出多种凝胶物质,活化土壤重金属离子^[22-23]。

综上可知,土壤微生物区系特征和土壤pH值显著影响土壤重金属赋存形态,蚯蚓活动显著改变了土壤微生物区系特征和土壤pH值,继而能够改变土壤中重金属赋存特征。然而鲜见蚯蚓活动对土壤Cr赋存形态影响的研究。因此本研究以不同酸碱度、不同Cr含量的土壤为对象,研究蚯蚓对土壤Cr赋存和土壤细菌群落的影响,为利用蚯蚓移除土壤Cr提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),3月龄,具有明显生育环,大小基本一致,平均体质量为512 mg·条⁻¹;试验用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)为优级纯。试验用酸性土壤取自福建省三明市,中性土壤取自江苏省扬州农业环境安全技术服务中心沙头试验基地,碱性土壤取自江苏省盐城市大丰区,土壤基本性质见表1。

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of test soil

土壤 Soil	pH值 pH value	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	Cr含量 Cr content/ (mg·kg ⁻¹)	土壤类型 Soil type
酸性土壤	5.88	12.25	9.96	红壤(黏质壤土)
中性土壤	7.55	11.59	14.95	水稻土(沙质壤土)
碱性土壤	8.97	14.38	11.08	水稻土(沙质壤土)

1.2 试验设计

试验设土壤Cr浓度(C1:15 mg·kg⁻¹、C2:50 mg·kg⁻¹),接种蚯蚓(E0:不接种蚯蚓,E1:接种赤子爱胜蚓),土壤酸碱性(S:酸性,Z:中性,J:碱性)3种变量,共12个处理,每个处理3次重复。首先,供试土壤风干后过2 mm筛,向土壤中定量加入30 g·L⁻¹重铬酸钾溶液,搅拌混匀,将土壤中Cr浓度调为15 mg·kg⁻¹(低Cr含量)和50 mg·kg⁻¹(高Cr含量),敞口避光静置45 d。其次,将静置后的土壤放入圆柱形塑料桶中(口径16 cm、底径13 cm、高17.5 cm),每个塑料桶装土1.0 kg,加入纯净水控制土壤含水量为饱和持水量的60%,静置7 d,加入40条经清肠处理的赤子爱胜蚓,以不添加蚯蚓为对照。第三,将各处理置于室内培养,并在桶口盖上一层纱布,防止蚯蚓逃逸,通过空调控制白天室温20~26℃,夜晚室温16~20℃,通过称取质量的方法每天补充纯净水,保持土壤含水量为饱和持水量的60%。蚯蚓处理30 d后,采集土壤、蚯蚓等样品,测定各指标。试验过程中无蚯蚓逃逸和死亡。

1.3 测定项目与方法

土壤pH值采用5:1水土比浸提法测定^[24]。土壤总Cr测定采用王小琳等^[25]提出的方法。Cr去除率=(接种蚯蚓前土壤总Cr含量-接种蚯蚓后土壤总Cr含量)/接种蚯蚓前土壤总Cr含量×100%。酸可提取态Cr、可还原态Cr、可氧化态Cr以及残渣态Cr的测定采用张永利等^[26]提出的方法。各形态Cr含量占比=各形态Cr含量/总Cr含量×100%。

蚯蚓生物量测定:蚯蚓样品收集后放入吸满纯净水的定性滤纸上清肠12 h^[27],然后,用吸水纸吸干蚯蚓体表水分,称质量。蚯蚓抑制率=(接种蚯蚓前蚯蚓生物量-接种蚯蚓后蚯蚓生物量)/接种蚯蚓前蚯蚓生物量×100%。蚯蚓体Cr富集量:清肠后的蚯蚓用吸水纸吸干蚯蚓体表水分,于-30℃下冷冻,然后放入烘箱65℃烘48 h^[28],磨碎后采用王水-高氯酸消煮-原子吸收光谱法测定Cr含量。在测定土壤和蚯蚓体内重金属含量时加入标准土GBW07978(GSS-

36),并保持加标回收率在95%以上。

土壤细菌群落多样性委托上海美吉生物制药有限公司采用基于Illumina MiSeq测序平台的高通量测序技术测定。利用双末端测序(Paired-End)的方法,构建小片段文库进行双末端测序。细菌的PCR体系包括:扩增时采用两管平行的方式,扩增体系为50 μL体系,包括Mix (Pfu·Easy) 25 μL,上游引物27F-FAM 1 μL,下游引物907R 1 μL,ddH₂O 22 μL,以及DNA模板1 μL。PCR的反应程序:94℃变性3 min;94℃30 s,58℃30 s,70℃1 min,循环30次;72℃延伸10 min。

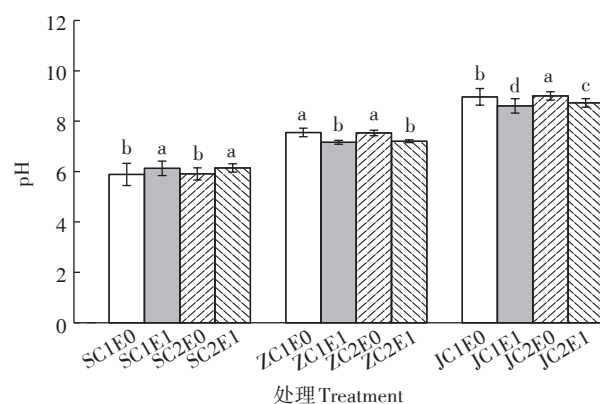
1.4 统计分析

采用Excel软件进行数据统计,SPSS 23.0软件对数据进行统计分析,数据正态分布检验和转换采用夏皮洛-威尔克检验法(Shapiro-Wilk法),数据分析采用单因素方差分析(One way ANOVA)模型检验,各处理间的差异显著性使用新复极差法(Duncan分析),采用Origin 8.5和Excel软件绘图,细菌群落测序数据依托Majorbio平台分析。

2 结果与分析

2.1 土壤pH值

不同酸碱性的Cr污染土壤在接种蚯蚓后,土壤pH值均发生了变化。由图1可知,酸性土壤接种蚯蚓后,土壤pH值提高了4.19%(C1)和4.01%(C2),且从改善效果来看,低Cr含量处理优于高Cr含量处理;



C1:低Cr含量,C2:高Cr含量;E0:不接种蚯蚓,E1:接种赤子爱胜蚓;S:酸性土壤,Z:中性土壤,J:碱性土壤。同一酸碱性的处理下不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

C1:low Cr content;C2:high Cr content;E0:no earthworm inoculation;E1:inoculation of *Eisenia foetida*;S:acidic soil;Z:neutral soil;J:alkaline soil. Different letters under the same acid-base treatment indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below

图1 土壤中pH值的变化情况

Figure 1 Changes of pH value in soil

中性和碱性土壤接种蚯蚓后,ZC1、ZC2、JC1和JC2的土壤pH值分别相应降低了5.21%、4.38%、3.98%和3.11%,且接种蚯蚓后,低Cr含量土壤pH值变化量大于高Cr含量土壤;中性土处理优于碱性土处理。综上,接种蚯蚓后,土壤pH值均向中性转变,虽无显著差异,但总体上低Cr含量土壤的pH值变化量大于高Cr含量处理。

2.2 土壤中Cr的赋存特征

2.2.1 土壤中Cr的去除率

已知在未接种蚯蚓,即静置状态下,土壤中Cr的去除率近似为0。由图2可知,不同酸碱性的Cr污染土壤在接种蚯蚓后,土壤Cr去除率显著提高了34.66~62.74个百分点。中性土处理优于碱性土和酸性土处理,在低Cr含量土壤中,ZC1E1(62.74%)显著高于JC1E1(54.94%)和SC1E1(60.69%),SC1E1显著高于JC1E1,在高Cr含量土壤中,ZC2E1(37.51%)显著高于JC2E1(35.40%)和SC2E1(34.66%)。在任一酸碱度土壤中,蚯蚓对低Cr含量土壤中的Cr去除率均优于高Cr含量土壤。总体来说,接种蚯蚓能够显著提高Cr的去除率,并且对中性低Cr含量土壤的Cd去除率最好。

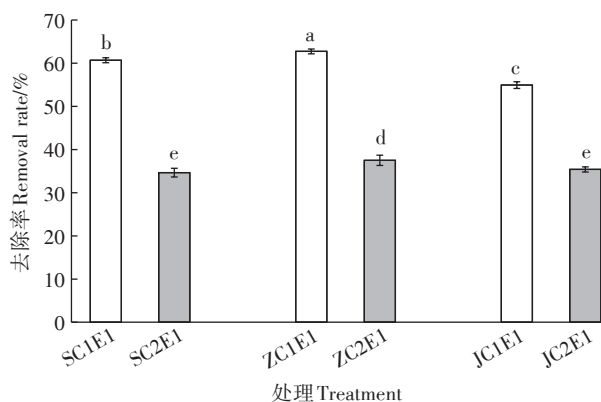


图2 土壤中Cr的去除率

Figure 2 The removal rate of Cr in the soil

2.2.2 土壤中Cr的各形态特征

不同酸碱性的Cr污染土壤在接种蚯蚓后,土壤Cr的赋存形态发生了显著变化。由图3可知,酸性土壤接种蚯蚓后,土壤中的酸可提取态Cr和可还原态Cr在低Cr含量土壤(C1)中分别提高了27.58个和26.70个百分点,在高Cr含量土壤(C2)中分别提高了21.99个和23.86个百分点;可氧化态Cr和残渣态Cr在C1处理中分别降低了10.03个和44.24个百分点,在C2处理中分别降低了20.47个和25.39个百分点。

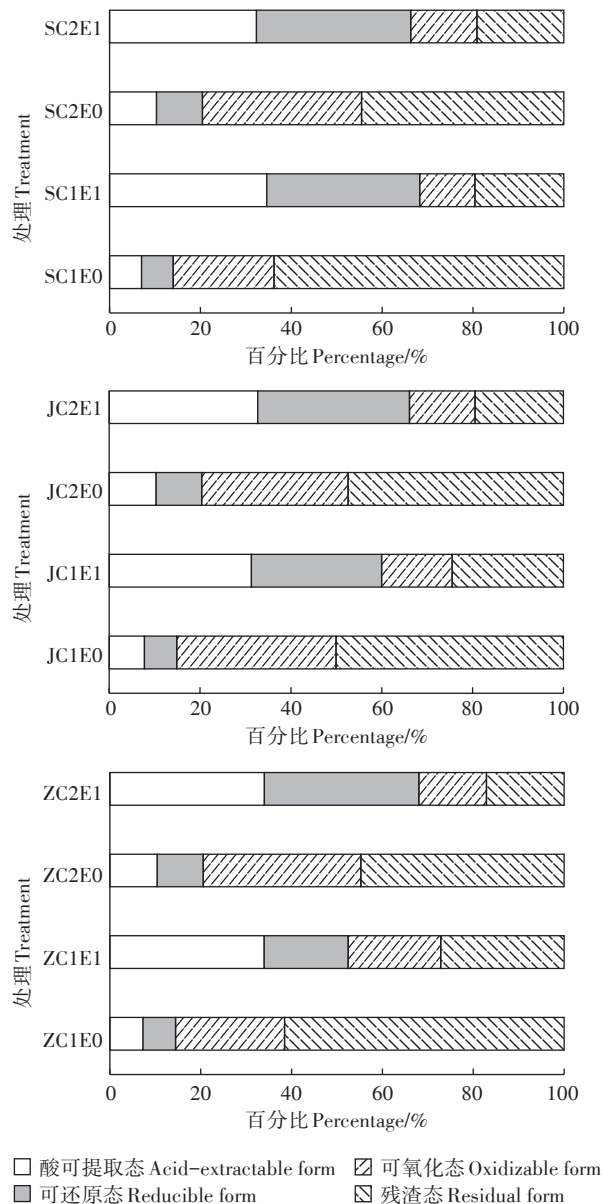


图3 土壤中Cr的各形态占比变化情况

Figure 3 Changes of various forms and proportions of Cr in soil

中性土壤接种蚯蚓后,土壤中的酸可提取态Cr和可还原态Cr在C1处理中分别提高了26.65个和11.37个百分点,在C2处理中分别提高了23.58个和23.90个百分点;可氧化态Cr和残渣态Cr在C1处理中分别降低了3.59个和34.42个百分点,在C2处理中分别降低了19.85个和27.64个百分点。碱性土壤接种蚯蚓后,土壤中的酸可提取态Cr和可还原态Cr在C1处理中分别提高了23.56个和21.53个百分点,在C2处理中分别提高了22.37个和23.41个百分点;可氧化态Cr和残渣态Cr在C1处理中分别降低了19.49个和25.60个百分点,在C2处理中分别降低了17.83个和

27.94个百分点。综上,接种蚯蚓能够有效提高土壤中Cr的生物有效性,土壤中稳定态Cr(残渣态、可氧化态)的含量显著降低,活性态Cr(酸可提取态、可还原态)的含量显著增加。蚯蚓对酸性低Cr含量土壤中的Cr的活化作用最强。

2.3 蚯蚓生物量抑制率与Cr富集量

由表2可知,蚯蚓吞食不同酸碱性的Cr污染土壤后蚯蚓生物量的抑制率为9.25%~26.58%,高Cr含量土壤中蚯蚓生物量的抑制率显著高于低Cr含量土壤,碱性土、酸性土和中性土处理对蚯蚓生物量的抑制率依次降低。本试验条件下,蚯蚓能够富集0.44~1.08 mg·g⁻¹的土壤Cr,高Cr含量土壤中蚯蚓体Cr富集量显著高于低Cr含量土壤,酸性土处理中蚯蚓体Cr富集量高于中性土和碱性土处理,但差异不显著。综上,高Cr含量土壤中蚯蚓生物量的抑制率和蚯蚓体Cr富集量均显著高于低Cr含量土壤,碱性土处理中蚯蚓生物量的抑制率最高,酸性土处理中蚯蚓体

Cr富集量最高。

2.4 土壤细菌群落变化情况

不同酸碱性的Cr污染土壤接种蚯蚓后,土壤细菌群落多样性和丰度发生显著变化。由表3可知,接种蚯蚓后,酸性土和中性土处理中土壤细菌群落的Shannon多样性指数显著降低,碱性土处理中土壤细菌群落的Shannon多样性指数在低Cr含量下显著降低,高Cr含量下变化不显著。接种蚯蚓后,SC1E1和JC2E1处理中土壤细菌群落的Chao指数和ACE指数均显著提高,中性土处理中土壤细菌群落的Chao指数和ACE指数变化不显著,碱性土处理中土壤细菌群落的Chao指数和ACE指数均显著高于酸性土和中性土处理。总体来说,接种蚯蚓提高了土壤Chao指数和ACE指数,即提高了细菌群落的丰度,降低了土壤Shannon多样性指数,即降低了细菌群落的多样性。

进一步分析(图4)可知,接种蚯蚓后,在门水平上3种酸碱度土壤的细菌群落结构物种丰度均发生了改变。变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和拟杆菌门(Bacteroidota)为优势菌群。酸性土接种蚯蚓后(图4A),土壤中变形菌门丰度提高了17个百分点(C1);放线菌门丰度降低了22个百分点(C1)和13个百分点(C2);绿弯菌门丰度提高了7个百分点(C2);拟杆菌门丰度降低了2个百分点(C1)和4个百分点(C2)。中性土接种蚯蚓后(图4B),土壤中变形菌门丰度C1处理提高了6个百分点,C2处理降低了27个百分点;放线菌门丰度提高了25个百分点(C2);拟杆菌门丰度降低了2个百分点(C1)和10个百分点(C2);绿弯菌门丰度提高了7个百分点(C2)。碱性土接种蚯蚓

表2 蚯蚓生物量抑制率与Cr富集量

Table 2 Inhibition rate of earthworm body and Cr enrichment

处理 Treatment	抑制率 Inhibition rate/%	Cr富集量 Cr enrichment content/(mg·g ⁻¹)
SC1E1	12.95±1.45c	0.52±0.04c
SC2E1	23.56±1.46ab	1.08±0.04a
ZC1E1	9.25±0.10d	0.45±0.03c
ZC2E1	20.72±0.48b	0.96±0.08b
JC1E1	15.97±0.96c	0.44±0.07c
JC2E1	26.58±1.02a	0.95±0.07b

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

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

表3 土壤细菌群落多样性和丰度分析(OTU水平)

Table 3 Analysis of diversity and abundance of soil bacterial community (OTU level)

处理 Treatment	Shannon指数 Shannon index	Chao指数 Chao index	ACE指数 ACE index	覆盖率 Coverage rate/%
SCK	5.32±0.01c	1 600.76±127.60de	1 589.97±126.70de	99.1±<0.1a
SC1E1	5.18±0.02e	2 038.26±234.60c	2 063.58±237.50c	99.3±0.1a
SC2E1	5.26±0.01d	1 900.00±106.30cd	1 933.28±108.20cd	98.9±0.1b
ZCK	5.31±0.01c	1 316.08±18.40e	1 327.75±18.50e	98.7±0.1b
ZC1E1	4.91±0.02g	1 660.76±44.00de	1 726.44±45.70de	99.1±<0.1a
ZC2E1	5.02±0.03f	1 605.11±80.70de	1 595.92±80.20de	99.1±0.2a
JCK	6.26±0.02a	2 690.96±139.10b	2 754.06±141.80b	98.4±0.1c
JC1E1	5.67±0.03b	2 711.46±76.90b	2 761.33±78.30b	98.2±0.2c
JC2E1	6.27±0.01a	3375.72±173.50a	3 370.31±173.20a	98.4±0.1c

注:CK为不同酸碱性的原始土壤,Shannon指数代表细菌群落的多样性,Chao指数和ACE指数代表细菌群落的丰度。

Note: CK is the original soil with different acidities and alkalinities, Shannon index represents the diversity of the bacterial community, and Chao index and ACE index represent the abundance of the bacterial community.

后(图4C),土壤中变形菌门丰度降低了9个百分点(C1)和7个百分点(C2);放线菌门丰度提高了23个百分点(C1)和5个百分点(C2);拟杆菌门丰度两处理均降低了6个百分点。总之,不同酸碱性Cr污染土壤接种蚯蚓,提高了土壤细菌群落中绿弯菌门丰度,降低了拟杆菌门丰度,酸性土处理的变形菌门丰度提高,放线菌门丰度降低,而中性土和碱性土处理的变形菌门丰度降低,放线菌门丰度提高,这与酸性土处

理变化趋势相反。

在属水平上(图5),各处理中丰度占比较高的物种为黄杆菌属(*Flavobacterium*)、关节杆菌属(*Arthrobacter*)、气单胞菌属(*Aeromonas*)、嗜糖假单胞菌属(*Pelomonas*)、汉单胞菌属(*Sinomonas*)、北里孢菌属(*Kitasatospora*)、丛毛单胞菌属(*Comamonas*)、鞘脂单胞菌属(*Sphingomonas*)和红球菌属(*Rhodococcus*)。酸性土壤接种蚯蚓后,土壤的黄杆菌属、气单胞菌属、

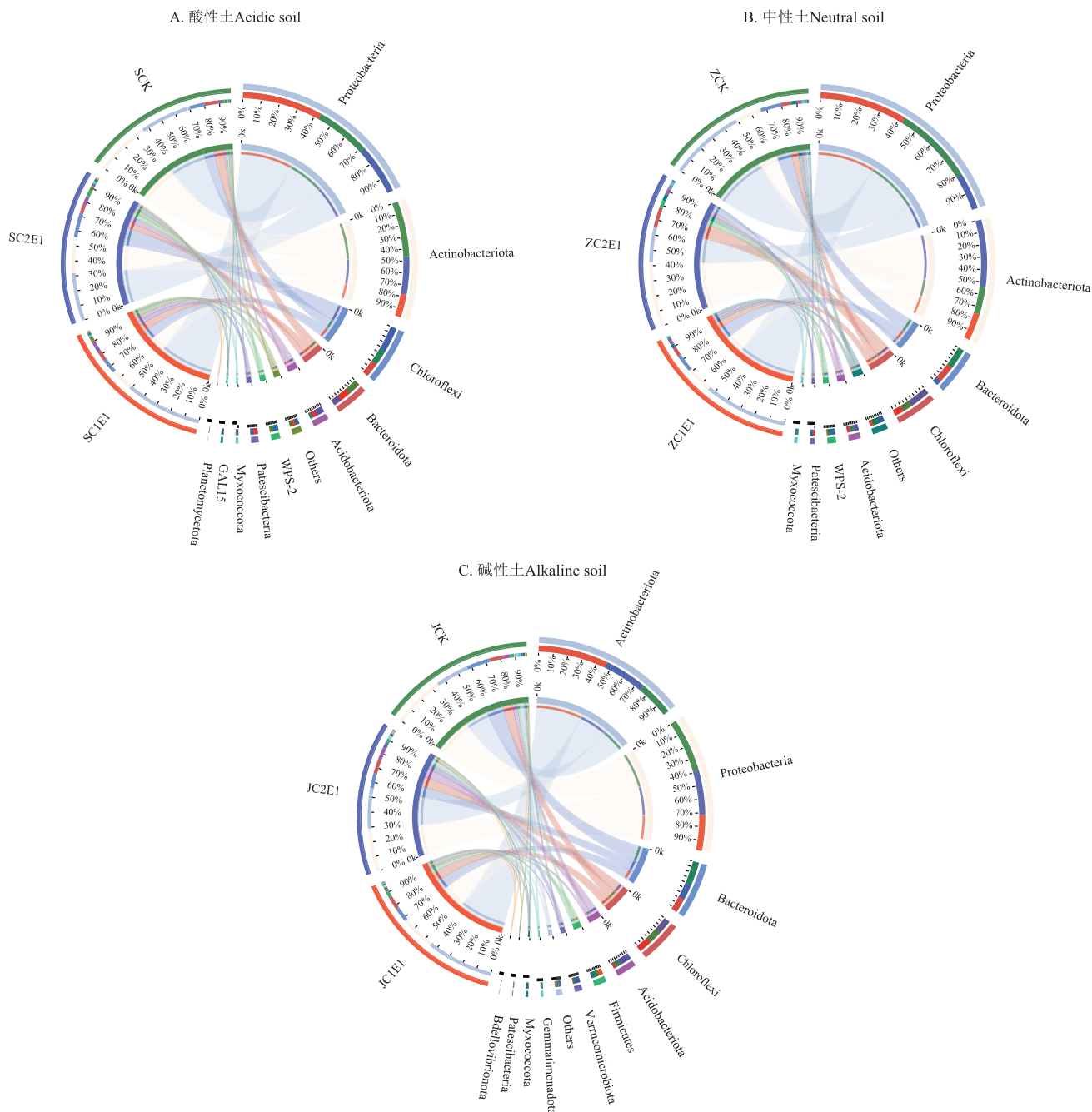


图4 不同酸碱性土壤中细菌群落(门水平)变化情况

Figure 4 Changes of bacterial community(phylum level) in soils with different pH

类诺卡氏菌属(*Nocardioide*s)丰度降低,嗜糖假单胞菌属、丛毛单胞菌属丰度提高;中性土壤接种蚯蚓后,土壤的关节杆菌属、汉单胞菌属、北里孢菌属、丛毛单胞菌属的丰度提高,嗜糖假单胞菌属的丰度降低;碱性土壤接种蚯蚓后,土壤的黄杆菌属、气单胞菌属的丰度降低,红球菌属的丰度提高。

由相关性分析(图6)可知,不同酸碱性的Cr污染土壤接种蚯蚓后,酸可提取态Cr含量与溶杆菌属(*Lysobacter*)、剑菌属(*Ensifer*)呈显著负相关,与假单胞杆菌属(*Pseudomonas*)、气单胞菌属呈极显著负相关,与关节杆菌属呈显著正相关;可还原态Cr含量与假单胞杆菌属呈显著负相关,与气单胞菌属、溶杆菌属呈极显著负相关,与鞘脂单胞菌属呈显著正相关;可氧化态Cr含量与红球菌属、微杆菌属(*Micribacterium*)呈显著负相关,与鞘脂单胞菌属呈显著正相关;残渣态Cr含量与类诺卡氏菌属、微枝形杆菌属(*Microvirga*)呈显著正相关。

3 讨论

3.1 接种蚯蚓对土壤pH值的影响

在接种蚯蚓后土壤pH值会发生改变^[29],前人研究发现蚯蚓对土壤pH值的影响是双向的,蚯蚓既可以分泌化学基团导致土壤酸化^[21],又可以通过自身钙化腺将钙化合物排泄到环境中导致土壤pH值升高^[20]。而在本研究中,接种蚯蚓使土壤pH值趋向中性,这可能与蚯蚓肠道具有稳定的中性pH值密切相关,土壤经过蚯蚓肠道时,蚯蚓肠道中的酸碱平衡体系使得吞食后的土壤偏中性^[30]。土壤pH值是影响重金属吸附-解吸行为和生物有效性的关键因素^[31],在本试验中,接种蚯蚓前后,酸性土壤中Cr的生物有效性均是最高,许多研究也证实了土壤pH值与金属有效性呈负相关的关系^[32-33]。本研究发现,从蚯蚓对不同酸碱性土壤pH值的改善效果来看,低Cr含量处理优于高Cr含量处理,而且接种蚯蚓对Cr的活化效果亦是如此,这表示蚯蚓对土壤pH值的改变可能与Cr的生物有效性存在一定联系。

3.2 接种蚯蚓对土壤中Cr赋存的影响

蚯蚓能够通过摄食和被动扩散作用富集土壤中的重金属^[6],其对重金属的富集量随着污染程度的增加而上升^[34]。本研究发现,接种蚯蚓后,高Cr含量土壤中的Cr去除率约为36%,低Cr含量土壤中的Cr去除率约为58%,高Cr含量土壤中蚯蚓体Cr富集量显著高于低Cr含量处理。

蚯蚓可以提高土壤中重金属的生物有效性,增加其流动部分。本研究发现,接种蚯蚓后酸性土处理中酸可提取态Cr提高了约24个百分点,残渣态Cr降低了约35个百分点;中性土处理中酸可提取态Cr提高了约25个百分点,残渣态Cr降低了约31个百分点;碱性土处理中酸可提取态Cr提高了约22个百分点,残渣态Cr降低了约26个百分点;土壤中Cr由潜在不流动形态向生物有效性较高的形态迁移,从而提高了植物对Cr的吸收富集^[35]。前人研究发现蚯蚓过腹可以活化土壤中的重金属,并显著增加植物的富集量^[36],蚯蚓也可以强化伴矿景天对土壤中重金属的修复效应^[37]。研究证明蚯蚓的活动可以改变土壤pH值,影响土壤有机物分解,提高土壤中的腐殖质、有机酸含量和溶解性有机碳(DOC)含量,从而增加重金属的溶解性,提高其生物有效性^[38,20]。有研究发现Cu在通过赤子爱胜蚓肠道后,由于有机质的分解,形成了具有高Cu络合能力的小分子有机酸,从而增加了Cu的流动性^[39]。在物理方面,蚯蚓通过挖洞吞食行为,对土壤进行了再分配,这被认为是增加重金属生物有效性的因素之一^[40]。蚯蚓活动还可以刺激土壤微生物活动,增加微生物数量并增强微生物活性^[41],而微生物活动可以直接或间接影响土壤重金属的存在形态,如WANG等^[42]发现,蚯蚓与丛枝菌根真菌结合能够提高土壤DTPA-Cr的含量。同时有研究发现^[39],接种蚯蚓不同时间后土壤中重金属的形态变化也不同,张冬明等^[17]研究发现,长期接种蚯蚓(60 d)比短期接种蚯蚓(30 d)对砖红壤中Pb的活化效果更好,而本试验仅选择了常规的30 d这一周期,后续试验中还需要探究更长周期的规律。

3.3 接种蚯蚓对土壤细菌群落的影响

微生物活性和群落结构变化能敏感地反映土壤质量和健康状况,是土壤环境质量评价的重要生物学指标^[43],而细菌是微生物中主要且重要的构成。有研究指出,土壤细菌群落特征对土壤重金属赋存形态存在显著影响^[44]。接种蚯蚓导致土壤细菌群落结构、多样性和丰度发生变化,从而提高了土壤中重金属的生物有效性,增加了植物对重金属的吸收^[11,45]。在本研究中,接种蚯蚓后,土壤的细菌群落多样性(Shannon指数)降低,这与XIA等^[46]的研究具有较高的一致性。本研究还表明,接种蚯蚓后土壤细菌群落的丰度(Chao指数、ACE指数)显著提高,原因可能是在Cd污染土壤中蚯蚓暴露会扰乱肠道中的微生物群落平衡,并提升蚯蚓肠道中的重金属抗性细菌丰度^[47],而蚓粪

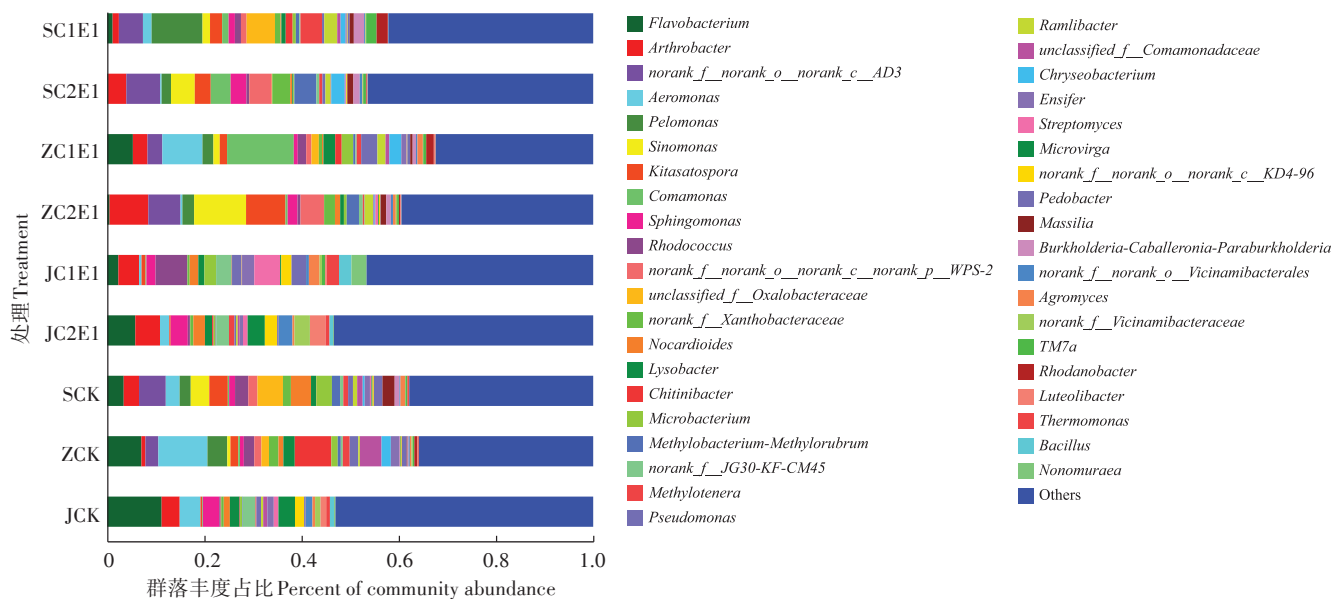
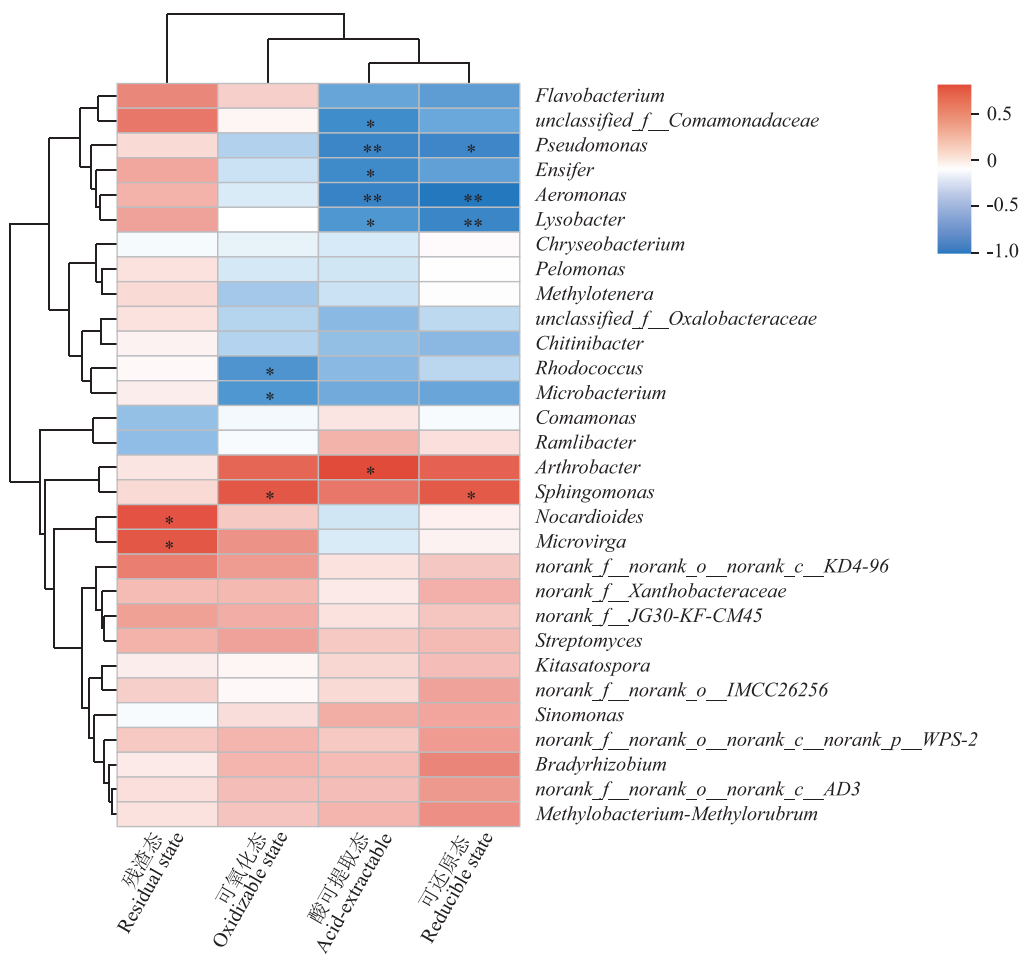


图5 不同酸碱性土壤中细菌群落(属水平)变化情况

Figure 5 Changes of bacterial community (genus level) in soils with different pH



“*”: 处理间差异显著 $P<0.05$, “**”: 处理间差异极显著 $P<0.01$

“**”: significant difference between treatments at $P<0.05$, “***”: significant difference between treatments at $P<0.01$

图6 土壤细菌群落与各形态Cr含量相关性分析

Figure 6 Correlation analysis between soil bacterial community and Cr content of various forms

中菌群与蚯蚓肠道微生物相关性极高。另外蚯蚓肠道内容物的pH值接近中性,水分和水溶性糖的含量均高于原土壤,从而为微生物的繁殖提供了条件,这也是导致菌群丰度提高的主要原因^[48]。本研究中,接种蚯蚓后,酸性土的变形菌门丰度提高,放线菌门丰度降低,而中性土和碱性土的变形菌门和拟杆菌门丰度降低,放线菌门丰度提高,并且低含量Cr土壤菌群丰度变化比高含量Cr土壤小,这与TANG等^[49]的研究类似,而且接种蚯蚓后优势菌群为变形菌门和放线菌门,这也与前人^[50]研究相符。优势菌群变化的原因可能是蚯蚓选择性吞食菌种以及肠道液对微生物的刺激作用^[51],而且蚯蚓通过摄取、改变和混合有机残留物和矿质土壤可以直接影响生态系统的结构和功能,这些行为改变了土壤结构及其化学和生物学性质,从而改变了土壤细菌群落的组成^[52]。

在本研究中,接种蚯蚓后,土壤中芽孢杆菌属和丛毛单胞菌属的丰度增加,这两者是耐重金属污染和具有修复重金属能力的细菌^[53-54],且丛毛单胞菌属也被证实对多种污染物有很好的降解效果^[55]。研究还发现假单胞杆菌属与生物有效性较高的Cr形态呈负相关,而金属载体通常由土壤中假单胞菌等产生^[56],所以这也可能是接种蚯蚓使土壤中Cr去除和Cr活化增加的原因。此外,接种蚯蚓后,碱性土低Cr含量处理中芽孢杆菌属的丰度高于高Cr含量处理。有研究发现^[57-58],蚯蚓取食弱碱性矿区土壤和酸性矿区土壤会增加土壤中假单胞杆菌属和芽孢杆菌属的丰度,这可能是因为此菌属对Cr具有较强的抗性。接种赤子爱胜蚓和威廉环毛蚓产生的鞘氨醇杆菌属(*Sphingobacterium*)已被证明与超富集植物东南景天可联合有效控制污染土壤中Cd含量^[59],接种(*Alcaligenes* sp.qz-1)产碱菌可以增加玉米对土壤Cr的吸收量^[60],而植物对重金属的吸收与其生物有效性密切相关^[61],这证明了细菌和重金属活性存在着一定的相关性,而蚯蚓就极有可能是二者间的桥梁。

4 结论

(1)不同酸碱性的Cr污染土壤在接种蚯蚓后,土壤pH值趋向中性。

(2)接种蚯蚓显著提高了土壤的Cr去除率,其中中性低Cr含量处理的效果最佳;同时能够有效提高土壤中Cr的生物有效性,且对酸性低Cr含量处理的活化效果最好。

(3)接种蚯蚓改变了土壤细菌群落的构成:变形

菌门、放线菌门、绿弯菌门和拟杆菌门为优势菌群,降低了菌群的多样性,提高了菌群的丰度。土壤中酸可提取态和可还原态Cr含量与溶杆菌属、剑菌属、假单胞杆菌属、气单胞菌属呈负相关,与关节杆菌属呈正相关;土壤中残渣态和可氧化态Cr含量与红球菌属、微杆菌属呈负相关,与类诺卡氏菌属、微枝形杆菌属呈正相关。

参考文献:

- [1] 冯凤玲, 成杰民, 王德霞. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 809-814. FENG F L, CHENG J M, WANG D X. Potential application of earthworm for the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 809-814.
- [2] FARID M, ALI S, RIZWAN M, et al. Phyto-management of chromium contaminated soils through sunflower under exogenously applied 5-aminolevulinic acid[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 151: 255-265.
- [3] ANDLEEB S, MAHMOOD T, KHALID A, et al. Hexavalent chromium induces testicular dysfunction in small Indian mongoose (*Herpestes javanicus*) inhabiting tanneries area of Kasur district, Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 1001-1009.
- [4] FARID M, ALI S, RIZWAN M, et al. Citric acid assisted phytoextraction of chromium by sunflower; morpho-physiological and biochemical alterations in plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145: 90-102.
- [5] LAVELLE P, PASHANASI B, CHARPENTIER F, et al. Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics[M]. Columbus: Earthworm Ecology, 1998.
- [6] 唐浩, 朱江, 黄沈发, 等. 蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 17-25. TANG H, ZHU J, HUANG S F, et al. Review on application of earthworm in soil heavy metal pollution and remediation[J]. *Soils*, 2013, 45(1): 17-25.
- [7] BLOUIN M, HODSON M E, DELGADO E A, et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(2): 161-182.
- [8] WANG F, JI R, JIANG Z, et al. Species-dependent effects of biochar amendment on bioaccumulation of atrazine in earthworms[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186: 241-247.
- [9] GU J, ZHOU W, JIANG B, et al. Effects of biochar on the transformation and earthworm bioaccumulation of organic pollutants in soil[J]. *Chemosphere*, 2016, 145: 431-437.
- [10] SIZMUR T, HODSON M E. Do earthworms impact metal mobility and availability in soil? A review[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 117(7): 1981-1989.
- [11] 代金君, 张池, 周波, 等. 蚯蚓肠道对重金属污染土壤微生物群落结构的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 95-102. DAI J J, ZHANG C, ZHOU B, et al. Effects of earthworm gut on microbial community structure in heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of*

- China Agricultural University, 2015, 20(5):95-102.
- [12] DAR G H. Soil microbiology and biochemistry[M]. New Delhi: New India Publishing, 2009.
- [13] PAUL E A. Soil microbiology, ecology, and biochemistry[M]. 3rd Edition. Pittsburgh: Academic Press, 2009.
- [14] RAURET G, LÓPEZ-SÁ NCHEZ J F, SAHUQUILLO A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1):57-61.
- [15] MORTIMER R J G, RAE J E. Metal speciation (Cu, Zn, Pb, Cd) and organic matter in oxic to suboxic salt marsh sediments, Severn estuary, southwest Britain[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(5):377-386.
- [16] 俞协治, 成杰民. 蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):922-928. YU X Z, CHENG J M. Effect of earthworm on bio-availability of Cu and Cd in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 23(5):922-928.
- [17] 张冬明, 李许明, 李福燕, 等. 蚯蚓影响下铅在砖红壤中的形态变化研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1):39-48. ZHANG D M, LI X M, LI F Y, et al. The research of Pb's various forms in the latosol by the effect of earthworm[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(1):39-48.
- [18] YU X Z, CHENG J, WONG M H. Earthworm-mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2):195-201.
- [19] UDOVIC M, PLAVC Z, LESTAN D. The effect of earthworms on the fractionation, mobility and bioavailability of Pb, Zn and Cd before and after soil leaching with EDTA[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(1):126-134.
- [20] WEN B, LIU Y, HU X Y, et al. Effect of earthworms (*Eisenia fetida*) on the fractionation and bioavailability of rare earth elements in nine Chinese soils[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(7):1179-1186.
- [21] QUAGGIOTTI S, RUPERTI B, PIZZEGHELLO D, et al. Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(398):803-813.
- [22] WANG D D, LI H X, WEI Z G, et al. Effect of earthworms on the phytoremediation of zinc-polluted soil by ryegrass and Indian mustard[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(1):120-123.
- [23] ZHOU Z, ZHOU J, LI R, et al. Effect of exogenous amino acids on Cu uptake and translocation in maize seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2007, 292:105-117.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:56-58. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:56-58.
- [25] 王小琳, 栾桂云, 管泽民, 等. 土壤中总铬测定方法的比较研究[J]. *土壤*, 2010, 42(3):497-501. WANG X L, LUAN G Y, GUAN Z M, et al. Comparing study on method to determine total chromium in soil[J]. *Soils*, 2010, 42(3):497-501.
- [26] 张永利, 刘晓文, 陈启敏, 等. Tessier法和改进BCR法提取施加熟污泥后黄土中Cd的对比研究[J]. *环境工程*, 2019, 37(5):34-38.
81. ZHANG Y L, LIU X W, CHEN Q M, et al. Comparative study of Tessier method and modified BCR method for extracting Cd in loess amended by composted sludge[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(5):34-38, 81.
- [27] 李晓彤. 聚酯纤维微塑料对蚯蚓 (*Eisenia foetida*) 生长的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2019. LI X T. Effects of polyester fibers on growth of the *Eisenia foetida*[D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [28] KAVEHEI A, HOSE G C, GORE D B. Effects of red earthworms (*Eisenia fetida*) on leachability of lead minerals in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237:851-857.
- [29] ZHOU D M, CHEN H M, HAO X Z, et al. Fractionation of heavy metals in soils as affected by soil types and metal load quantity[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(4):309-319.
- [30] THAKURIA D, SCHMIDT O, FINAN D, et al. Gut wall bacteria of earthworms: A natural selection process[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(3):357-366.
- [31] KANG J, ZHANG Z Q, WANG J J. Influence of humic substances on bioavailability of Cu and Zn during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(17):8022-8026.
- [32] WANG Y Y, JI H Y, LYU H H, et al. Simultaneous alleviation of Sb and Cd availability in contaminated soil and accumulation in *Lolium multiflorum* Lam. After amendment with Fe-Mn-Modified biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231:556-564.
- [33] 林海, 靳晓娜, 董颖博, 等. 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(2):945-952. LIN H, JIN X N, DONG Y B, et al. Effects of bentonite on chemical forms and bioavailability of heavy metals in different types of farmland soils[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2):945-952.
- [34] 张友梅, 王振中, 邢协加, 等. 土壤污染对蚯蚓的影响[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 1996, 19(3):84-90. ZHANG Y M, WANG Z Z, XING X J, et al. On effects of earthworm by soil pollution[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 1996, 19(3):84-90.
- [35] 段桂兰, 崔慧灵, 杨雨萍, 等. 重金属污染土壤中生物间相互作用及其协同修复应用[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(3):455-470. DUAN G L, CUI H L, YANG Y P, et al. Interactions among soil biota and their applications in synergistic bioremediation of heavy-metal contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):455-470.
- [36] 刘德鸿, 成杰民, 刘德辉. 蚯蚓对土壤中铜、镉形态及高丹草生物有效性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(2):209-214. LIU D H, CHENG J M, LIU D H. Effect of earthworm on Cu and Cd forms and their availability to *Sorghum bicolor* × *S. sudanense*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(2):209-214.
- [37] 王孜楠, 李柱, 刘鸿雁, 等. 不同类型污染土壤中赤子爱胜蚓对伴矿景天重金属吸收的影响初报[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(3):549-559. WANG Z N, LI Z, LIU H Y, et al. Effect of *Eisenia foetida* on the metal uptake by *Sedum plumbizincicola* in different types of contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):549-559.

- [38] UDOVIC M, LESTAN D. The effect of earthworms on the fractionation and bioavailability of heavy metals before and after soil remediation[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(2):663–668.
- [39] SIZMUR T, PALUMBO-ROE B, WATTS M J, et al. Impact of the earthworm *Lumbricus terrestris* (L.) on As, Cu, Pb and Zn mobility and speciation in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3):742–748.
- [40] LEVEQUE T, DUMAT C, LAGIER L, et al. Influence of earthworm bioturbation on metals phytoavailability and human gastric bioaccessibility[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20):20052–20063.
- [41] BOHLEN P J, EDWARDS C A. Earthworm effects on N dynamics and soil respiration in microcosms receiving organic and inorganic nutrients[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(3):341–348.
- [42] WANG G, WANG L, MA F, et al. Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389:121873.
- [43] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 等. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(1):22–27. WANG X L, XU J M, YAO H Y, et al. Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1):22–27.
- [44] 申为宝, 杨洪强. 蚯蚓和微生物对土壤养分和重金属的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3):760–765. SHEN W B, YANG H Q. Effects of earthworm and micro-organism on soil nutrient and heavy metal[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3):760–765.
- [45] 王丹丹, 李辉信, 魏正贵, 等. 蚯蚓和秸秆对铜污染土壤微生物类群和活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5):1113–1119. WANG D D, LI H X, WEI Z G, et al. Effects of earthworm inoculation and straw amendment on soil microflora and microbial activity in Cu contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5):1113–1119.
- [46] XIA S Q, ZHAO H T, WU Y F, et al. Effect of feeding conditions on the degradation of tetracycline in sewage sludge by earthworm[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, 160:107608.
- [47] MAJA Š, SEBASTIAN M, MARTINA H, et al. Earthworms and cadmium-Heavy metal resistant gut bacteria as indicators for heavy metal pollution in soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171:843–853.
- [48] 龙建亮, 张池, 杨远秀, 等. 赤子爱胜蚓对两种土壤中细菌群落结构组成及多样性的影响[J]. *动物学杂志*, 2018, 53(6):963–977. LONG J L, ZHANG C, YANG Y X, et al. Effects of *Eisenia fetida* on the bacterial community structure compositions and diversities in two types of soils[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2018, 53(6):963–977.
- [49] TANG R, LI X, MO Y, et al. Toxic responses of metabolites, organelles and gut microorganisms of *Eisenia fetida* in a soil with chromium contamination[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251:910–920.
- [50] LIU P, YANG Y, LI M. Responses of soil and earthworm gut bacterial communities to heavy metal contamination[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265:114921.
- [51] TIUNOV A V, SCHEU S. Microfungal communities in soil, litter and casts of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae): A laboratory experiment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(1):17–26.
- [52] BYZOV B A, KHOMYAKOV N V, KHARIN S A, et al. Fate of soil bacteria and fungi in the gut of earthworms[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(Suppl 1):149–156.
- [53] FOSSO-KANKEU E, MULABA-BAFUBIANDI A F, MAMBA B B, et al. Prediction of metal-adsorption behaviour in the remediation of water contamination using indigenous microorganisms[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10):2786–2793.
- [54] BRAUD A, JÉZÉQUEL K, BAZOT S, et al. Enhanced phytoextraction of an agricultural Cr- and Pb- contaminated soil by bioaugmentation with siderophore-producing bacteria[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(2):280–286.
- [55] WANG Y X, OYAIU H. Enhanced remediation of dioxins spiked soil by a plant-microbe system using a dibenzofuran-degrading *Comamonas* sp. and *Trifolium repens* L.[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(7):1109–1114.
- [56] NEILANDS J, LEONG S A. Siderophores in relation to plant growth and disease[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1986, 37(1):187–208.
- [57] 卞光凯, 张越己, 秦盛, 等. 南通沿海滩涂耐盐植物重金属抗性内生细菌的筛选及生物多样性[J]. *微生物学报*, 2011, 51(11):1538–1547. BIAN G K, ZHANG Y J, QIN S, et al. Isolation and biodiversity of heavy metal tolerant endophytic bacteria from halotolerant plant species located in coastal shoal of Nantong[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2011, 51(11):1538–1547.
- [58] CHEN L, LUO S, CHEN J, et al. Diversity of endophytic bacterial populations associated with Cd-hyperaccumulator plant *Solanum nigrum* L. grown in mine tailings[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 62:24–30.
- [59] FANG H, ZHOU W, CAO Z, et al. Combined remediation of DDT congeners and cadmium in soil by *Sphingobacterium* sp. D-6 and *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(6):1036–1046.
- [60] 熊智慧, 朱莹莹, 周清, 等. 产碱菌 *Alcaligenes* sp. qz-1 对铬污染土壤中玉米生长和铬累积的影响研究[J]. *生态科学*, 2018, 37(4):52–58. XIONG Z Z, ZHU Y Y, ZHOU Q, et al. Effects of chromium (VI) tolerant bacteria *Alcaligenes* sp. qz-1 on growth and uptake of chromium (VI) in maize *Zea mays* L.[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(4):52–58.
- [61] 史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 等. EDTA 与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染土壤中铅镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8):1634–1641. SHI D D, LIANG X D, XU S H, et al. Effects of EDTA and resistant bacteria on the uptake of Pb and Cd by ryegrass grown in Pb and Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1634–1641.

(责任编辑:李丹)