

复合菌和鸡粪生物炭对镍和镉污染土壤的修复效果研究

杨昶, 陈元晖, 张春燕, 张羽, 李明堂

引用本文:

杨昶, 陈元晖, 张春燕, 张羽, 李明堂. 复合菌和鸡粪生物炭对镍和镉污染土壤的修复效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1709–1719.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1491>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质炭对长期铅镉复合污染土壤微生物群落丰度及活性的影响

邵佳, 赵远来, 冯琰玉, 潘洋, 于金珠, 秦华, 陈俊辉

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 66–74 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0478>

施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响

悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 刘领

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2118–2126 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0242>

钝化材料对农田土壤Cd形态及微生物群落的影响

兰玉书, 袁林, 杨刚, 程蓉, 石楷岐, 高本汗

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2743–2751 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0637>

生物炭施用对小麦和玉米幼苗根际和非根际土壤中Pb、As和Cd生物有效性的影响研究

黄黎粤, 丁竹红, 胡忻, 陈逸珺

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 348–355 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0463>

不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响

安梅, 董丽, 张磊, 孙崇海, 夏培玉

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 892–898 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1388>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨昶, 陈元晖, 张春燕, 等. 复合菌和鸡粪生物炭对镍和镉污染土壤的修复效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1709–1719.

YANG Y, CHEN Y H, ZHANG C Y, et al. Remediation effect of compound bacteria and chicken manure-derived biochar in nickel- and cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1709–1719.



开放科学 OSID

复合菌和鸡粪生物炭对镍和镉污染土壤的修复效果研究

杨昶, 陈元晖, 张春燕, 张羽, 李明堂*

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要:微生物和生物炭通过协同作用可实现重金属污染土壤的低碳、绿色修复,但是目前相关研究较少。本研究通过玉米盆栽试验,研究了多功能复合菌和鸡粪生物炭对镍(Ni)和镉(Cd)污染土壤的修复。研究表明,单一和共同作用下复合菌和不同粒径生物炭均能不同程度地固定土壤中的Ni和Cd,减轻Ni和Cd的毒害并降低玉米幼苗对Ni和Cd的吸收,增加根际土壤细菌、真菌群落结构丰富度与物种多样性,其中复合菌和粒径较小的微米生物炭(1.6~55.8 μm)联合修复效果最好。与对照相比,复合菌和微米生物炭联合修复下根际土壤中碳酸盐结合态Ni和Cd的含量分别升高了59.9%和68.4%,有效态Ni和Cd的含量降低了66.5%和53.8%,促进了盆栽玉米幼苗的生长发育,提高了抗氧化能力,使玉米根部的Ni和Cd含量分别降低了49.3%和41.9%,地上部的Ni和Cd含量分别降低了69.4%和53.0%,降低了Ni和Cd在叶片细胞器中的占比,并以低毒形态存在;根际土壤中细菌和真菌的OTU数目显著增加,优势菌群的丰富度和多样性提高,根际土壤微生物群落结构改善。以上研究结果表明多功能微生物和生物炭具有协同修复效应,可为重金属污染土壤联合修复提供理论依据和技术支持。

关键词:镍;镉;土壤修复;多功能微生物;生物炭;微生物群落

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)08-1709-11 doi:10.11654/jaes.2021-1491

Remediation effect of compound bacteria and chicken manure-derived biochar in nickel- and cadmium-contaminated soil

YANG Yi, CHEN Yuanhui, ZHANG Chunyan, ZHANG Yu, LI Mingtang*

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Microorganisms and biochar may achieve synergistic low-carbon, green remediation of heavy metal-contaminated soils, but there has been little research on this topic. In the present study, a corn pot experiment was performed to evaluate the remediation of nickel (Ni)- and cadmium (Cd)-contaminated soil by multifunctional compound bacteria and chicken manure-derived biochar. In both single and combined remediation experiments, compound bacteria and biochar with different particle sizes immobilized Ni and Cd in the soil to varying degrees, reduced the uptake of Ni and Cd in maize seedlings, and increased the structural richness and species diversity of bacteria and fungi in rhizosphere soil. The most efficient remediation effect was attributed to the combination of compound bacteria and micron-scale biochar with a smaller particle size (1.6~55.8 μm). Using this remediation strategy, the amount of available Ni and Cd decreased by 66.5% and 53.8%, respectively, and the amount of carbonate-bound Ni and Cd increased by 59.9% and 68.4%, respectively, in rhizosphere soil. Moreover, combined remediation with compound bacteria and micron-scale biochar resulted in improved growth performance and increased antioxidant capacity of potted maize seedlings. The Ni and Cd content in maize roots decreased by 49.3% and 41.9%, respectively, and the Ni and Cd content of the aboveground parts of the plants decreased by 69.4% and 53.0%, respectively, after

收稿日期:2021-12-27 录用日期:2022-03-28

作者简介:杨昶(1998—),女,吉林长春人,硕士研究生。E-mail:yangyi0686@163.com

*通信作者:李明堂 E-mail:limtdoc2008@163.com

基金项目:吉林省重点研发计划项目(20200403003SF);国家自然科学基金项目(42077137)

Project supported: The Key Research and Development Program of Jilin Province, China (20200403003SF); The National Natural Science Foundation of China (42077137)

combined remediation. Combined remediation with compound bacteria and micron-scale biochar also increased biological activity in rhizosphere soil, as indicated by an increased number of operational taxonomic units of bacteria and fungi, improved richness and diversity of the dominant microbial flora, and improved microbial community structure. These results show that multifunctional microorganisms and biochar have synergistic remediation effect, and provide the theoretical basis and technical support for the combined remediation of heavy metal-contaminated soil.

Keywords: nickel; cadmium; soil remediation; multifunctional microorganism; biochar; microbial community

重金属污染土壤的治理修复一直是农业环境领域研究的难点和重点,在碳达峰和碳中和背景下,研发低碳绿色修复技术对解决目前重金属污染土壤治理修复中存在的问题,保障农田生态系统安全和粮食安全具有重要的现实意义^[1-2]。环境中存在着一类可通过自身的生产代谢过程诱导形成重金属碳酸盐沉淀的微生物,利用此类微生物能促进重金属形态的转化,对土壤中的重金属起到固定作用^[3],并且可参与重金属污染土壤的微生态调控,因此近几年在重金属污染土壤修复方面越来越受到人们的重视^[4-5],但此类微生物在土壤中往往缺乏竞争力,且对重金属的固定效果易受到土壤酸化的影响^[6-7],因此提高微生物在土壤中的生存竞争力、增强微生物的修复效果已成为在实际应用中需要迫切解决的问题。生物炭具有比表面积较大、孔隙结构和官能团丰富、吸附性较强等特点,不仅能够吸附固定土壤中的重金属,对土壤酸化起到缓冲作用,而且能够为微生物的生长提供载体环境,已有部分研究证明了利用微生物和生物炭共同作用对重金属污染土壤的联合修复效果优于单一修复^[8-9]。目前,针对重金属碳酸盐矿化菌和生物炭对重金属污染土壤进行联合修复的研究相对较少,并且往往忽视了菌株的其他功能^[10],植物促生菌可以通过产生吲哚乙酸和铁载体等物质促进植物生长,增强植物对重金属的抗性,降低植物对重金属的吸收^[11-12],利用微生物既能固定土壤中的重金属又能促进植物生长增强其抗性,研究其与生物炭对重金属污染土壤的联合修复效果,对重金属污染土壤的修复治理具有重要意义。

吉林省磐石红旗岭矿区已经有约60年的开采历史,周边耕地土壤重金属逐渐累积危及人体健康,成为亟待解决的土壤环境问题之一^[13]。研究表明该区域耕地土壤镍(Ni)和镉(Cd)的平均含量已达到吉林省土壤背景值的4.4倍和1.3倍,局部污染区域土壤Ni和Cd的超标率高达50%以上,玉米籽粒中Ni和Cd的超标率也在50%以上^[14-16]。目前,微生物和生物炭单一技术对重金属污染土壤虽然具有较好的修复潜

力,但在实际应用中存在诸多障碍,与单一技术相比,微生物-生物炭联合修复技术不仅能够克服单一修复稳定性差、功能单一、持久性低的缺点,而且具有功能互补和协同增效的优点^[17]。因此,本研究通过利用吉林省矿区污染土壤进行玉米盆栽试验,研究了同时具有重金属碳酸盐矿化和植物促生功能的复合菌和生物炭在单一和联合作用下对Ni和Cd污染土壤的修复效果,以期利用具有多种功能的复合微生物和生物炭高效修复Ni和Cd污染土壤提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自吉林省磐石红旗岭镍矿区周围的耕地土壤,自然风干过2 mm筛后用于玉米盆栽试验。供试土壤pH为5.4,有机质含量为2.5%,碱解氮含量为39.4 mg·kg⁻¹,有效磷含量为15.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量为159.0 mg·kg⁻¹,土壤Ni的总量和有效态含量分别为292.5、42.1 mg·kg⁻¹,土壤Cd的总量和有效态含量分别为10.3、0.8 mg·kg⁻¹。

供试玉米(*Zea mays* L.)为金苑玉z658(*Jinyuanyu* z658),品种审定编号为辽审玉20180155,品种来源CY04×TY04。

供试菌株为本实验室从Ni和Cd复合污染的土壤中分离筛选出对Ni和Cd均具有较高抗性的沙福芽孢杆菌N4和睾丸酮丛毛单胞菌ZG2。菌株N4为沙福芽孢杆菌*Bacillus safensis*, Genbank登录号为NR 041794.1,菌株ZG2为睾丸酮丛毛单胞菌*Comamonas testosteroni*, Genbank登录号为NR 116138.1。菌株N4产吲哚乙酸能力强,并能协同生物炭降低小白菜对Ni和Cd的吸收^[18]。菌株ZG2产脲酶、吲哚乙酸和铁载体,并可诱导形成重金属碳酸盐沉淀来固定土壤中的Ni和Cd^[19]。

复合菌剂的制备:将菌株N4和ZG2在28℃和160 r·min⁻¹振荡培养24 h的条件下利用牛肉膏蛋白胨培养基进行活化和富集培养,将富集培养液按2%

的比例接种到新鲜的牛肉膏蛋白胨培养基中在相同条件下培养,将培养后的发酵液在4℃和8 000 r·min⁻¹条件下离心5 min,弃去上清液,用无菌水冲洗菌体细胞2次,然后将其再悬浮于无菌水中,得到OD₆₀₀为0.3左右的单一菌株菌悬液,按照1:1的比例混合,即为用于土壤修复的复合菌剂。

参照已报道的研究方法,将鸡粪在缺氧和600℃条件下热解得到的产物为供试生物炭^[20],供试生物炭的元素组成为C:39.3%、H:1.1%、O:35.4%、N:1.8%;pH为12.8、EC为10.9 mS·cm⁻¹、灰分为21.6%。生物炭过200目筛后,将剩余未过筛的生物炭放入研钵中研磨,如此重复直至全部过200目筛后得到供试微米生物炭。供试生物炭的粒径范围为50.0~300.0 μm,中位粒径D50为250.0 μm;供试微米生物炭的粒径范围为1.6~55.8 μm,中位粒径为18.0 μm,显著低于供试生物炭,处于微米级^[21]。生物炭的粒径分布特征如表1所示。

表1 生物炭的粒径分布特征

Table 1 Particle size distribution characteristics of the biochar

项目 Item	生物炭 Biochar		微米生物炭 Micron Biochar	
	粒径 Particle size/μm	累积百分含量 Cumulative percentage/%	粒径 Particle size/μm	累积百分含量 Cumulative percentage/%
D6	50.0	6.0	1.6	6.2
D10	75.0	11.2	2.5	11.2
D25	150.0	39.2	6.5	27.0
D50	250.0	61.8	18.0	52.2
D90	300.0	37.3	55.8	39.2

1.2 土壤修复试验

向土壤样品中添加0.2%的尿素,并混合均匀,用于土壤修复试验。设置以下处理:无任何添加的对照处理(CK)、只添加复合菌剂(T1)、只添加生物炭(T2)、只添加微米生物炭(T3)、添加复合菌剂和生物炭(T4)、添加复合菌剂和微米生物炭(T5)。每种处理用土1 500 g,设置3组平行。生物炭和复合菌剂的添加方式:按照3%的比例^[22]将生物炭和微米生物炭分别加入到土壤中,混合均匀,一部分装入塑料盆(规格为上口直径16 cm、下口直径11 cm、高13 cm)作为T2和T3处理;将剩余部分先分别取少量平铺于盆底,喷洒复合菌剂湿润,再平铺一层,再喷洒复合菌剂,如此重复,直至150 mL复合菌剂均匀喷洒于1 500 g土样中,分别作为T4和T5处理;用同样的方式向未添加生物炭的土样中喷洒复合菌剂,作为T1处理。向未添加生物炭的土样中喷洒150 mL无菌水作为CK处理。

将上述处理后的土壤样品中加入适量的蒸馏水进行湿润,然后移入人工气候箱,在光照强度为2 000 lx,温度为25℃,湿度60%,光暗比1:1条件下稳定修复一周,2 d喷水一次以维持土壤湿度。

1.3 玉米盆栽试验

挑选颗粒饱满无破损的玉米种子,以2%的NaClO溶液浸泡10 min后用蒸馏水冲洗干净,在28℃下用蒸馏水浸种6 h,均匀摆放于铺有湿润纱布的育苗盘中避光催芽,出芽后恢复光照并挑选长势一致的玉米幼苗均匀移栽于修复后的土壤中,每盆2株。移栽完成后,向T1、T4、T5处理幼苗根际土壤施加10 mL复合菌悬液。向每盆补充水分至水从盆底孔隙中微微渗出,移入人工气候箱(光照强度2 000 lx,温度25℃,湿度60%,光暗比1:1)进行培养,每5 d浇水一次保证玉米幼苗的正常生长,培养30 d后将玉米幼苗取出,收集与幼苗根部紧密结合的土壤即为根际土壤样品,然后用去离子水将幼苗根部洗净吸干水分,分离根部与地上部,置于105℃烘箱杀青30 min,调为60℃烘干至恒质量,粉碎后备测。

1.4 测定方法

用CEM MARS6微波消解仪对土壤和植物样品进行消解,采用Tessier五步法对土壤中Ni和Cd的化学形态进行提取^[23],采用DTPA浸提法提取土壤中Ni和Cd的有效态,参考闫雷等^[23]的方法对叶片Ni和Cd的亚细胞分布及化学形态进行分离和提取,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7900)对上述过程获得的溶液进行Ni和Cd含量的测定^[14]。

叶片SPAD值采用SPAD-502Plus手持叶绿素仪测定,超氧化物歧化酶(SOD)活力采用总超氧化物歧化酶试剂盒(T-SOD)测定,丙二醛(MDA)含量采用丙二醛试剂盒测定。

玉米根系逐层剪开,分批放入玻璃皿内并用镊子展开分枝,用EPSON V800高分辨率扫描仪扫描根部图像,再用WinRHIZO根系分析系统对扫描得到的全部图像进行分析,最后将每张图像对应的全部数据相加,即为测得的根系形态数据^[24-25]。

土壤微生物多样性检测由北京奥维森基因科技有限公司完成。细菌选取16S rDNA区域扩增,真菌选取ITS1区域扩增,利用Illumina Miseq高通量测序平台测序。

1.5 数据分析

不同处理数据的差异性分析采用SPSS 23中单因素ANOVA检验,使用 $P<0.05$ 确定数据的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同修复处理对根际土壤 Ni 和 Cd 形态分布和有效态含量的影响

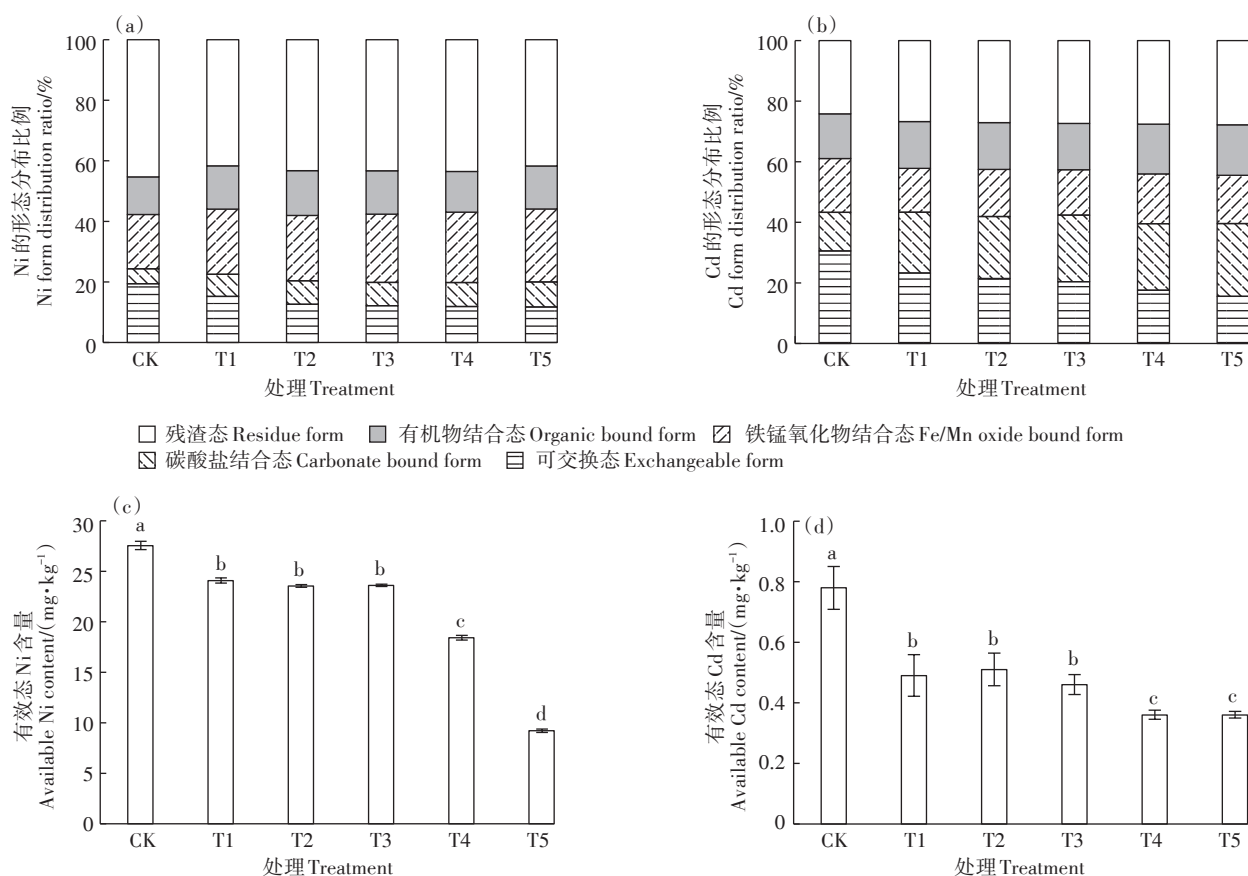
根际土壤中 Ni 和 Cd 的形态分布如图 1a 和 1b 所示。从图中可以看出,各处理均降低了根际土壤中可交换态 Ni 和 Cd 的比例,使可交换态 Ni 向碳酸盐结合态及铁锰氧化物结合态转化,使可交换态 Cd 向碳酸盐结合态及残渣态转化,并且联合修复的效果大于单一修复。与 CK 相比, T5 处理使碳酸盐结合态 Ni 和 Cd 的含量分别升高了 59.9% 和 68.4%,碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Ni 的占比分别提高了 67.9% 和 34.5%,碳酸盐结合态和残渣态 Cd 的占比分别提高了 88.3% 和 14.9%。根际土壤 Ni 和 Cd 的有效态含量如图 1c 和 1d 所示,与 CK 相比,各处理均不同程度降低了根际土壤 Ni 和 Cd 的有效态含量,联合处理的效果优于单一处理,其中 T5 处理使 Ni 和 Cd 有效态含量分别降低了 66.5% 和 53.8%。

2.2 不同修复处理对玉米幼苗生长发育和抗氧化能力的影响

从表 2 可以看出,复合菌和生物炭修复对盆栽玉米幼苗产生了多方面的促进作用,玉米幼苗的主根长、株高、生物量、叶绿素值 SPAD 均不同程度地增大,幼苗叶片的 SOD 活力增强,MDA 的累积量降低。总体作用顺序为 T5>T4>T3>T2>T1。与 CK 相比, T5 处理使玉米幼苗的株高、主根长、生物量、叶绿素值 SPAD 分别增加了 103.6%、159.6%、550.9%、77.1%,幼苗叶片的 SOD 活力增强了 35.0%,MDA 含量降低了 90.1%。

2.3 不同修复处理对玉米幼苗根系形态的影响

从表 3 可以看出,修复后的土壤环境显著促进了玉米幼苗的根系发育,使玉米根系各项形态指标均显著升高,促进了玉米幼苗根部伸长的同时显著增加了玉米幼苗须根的数量,有利于玉米幼苗形成更发达的次生根系,总体作用顺序为 T5>T4>T3>T2>T1。与 CK 相比, T5 处理使玉米总根长、根投影面积、根表面



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 修复对根际土壤 Ni 和 Cd 形态分布和有效态含量的影响

Figure 1 Effects of remediation on the fraction distribution and available contents of Ni and Cd in rhizosphere soil

积、根直径与根体积分别增大了57.1、42.0、41.2、7.2、31.3倍。

2.4 不同修复处理对玉米幼苗Ni和Cd含量的影响

如图2所示,不同修复处理均降低了玉米根部和地上部对Ni和Cd的吸收,减少了玉米根部、地上部Ni和Cd的含量,总体修复效果顺序为T5>T4>T2>T3>T1。与CK相比,T5处理使玉米根部与地上部的Ni含量分别降低了49.3%、69.4%,Cd含量分别降低了41.9%、53.0%。

2.5 不同修复处理对叶片Ni和Cd亚细胞分布和形态分布的影响

从图3a和3b可以看出,复合菌和生物炭单一及

联合修复均增加了叶片细胞壁和可溶性部分结合Ni和Cd的比例,减少了细胞器中Ni和Cd的比例,从而减轻了叶片细胞受到的毒害,提高了幼苗的抗性;从图3c和3d可以看出,复合菌和生物炭修复降低了叶片中两种迁移活性强的高毒性形态Ni和Cd(F_E 、 F_W)的分布比例之和,增加了其他四种活性较弱的低毒性形态Ni和Cd(F_{NaCl} 、 F_{HCl} 、 F_{HAc} 、 F_R)的分布比例之和,因此减弱了Ni和Cd在叶片中的迁移活性,从而降低其毒性。与CK相比,T5处理使细胞器组分中Ni和Cd的分布比例分别下降了25.6%和22.9%;使 F_E 、 F_W 两种形态的Ni和Cd的分布比例之和分别降低了40.2%、42.8%, F_{NaCl} 、 F_{HCl} 、 F_{HAc} 、 F_R 四种形态的Ni和Cd

表2 修复对玉米幼苗生长发育和抗氧化能力的影响

Table 2 Effects of remediation on growth and antioxidant capacity of maize seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	主根长 Tap root length/cm	生物量 Biomass/(g·株 ⁻¹)	叶绿素SPAD Chlorophyll SPAD	SOD活力 SOD vitality/(U·g ⁻¹)	MDA含量 MDA content/(nmol·g ⁻¹)
CK	33.67±3.27d	9.57±0.80f	1.32±0.05e	27.5±2.74d	92.06±0.16f	108.82±0.41a
T1	53.23±4.61c	11.07±0.21e	3.95±0.19d	38.67±0.91c	109.87±0.23e	66.18±0.28b
T2	51.97±4.11c	13.57±0.31d	4.87±0.08c	38.27±0.86c	152.32±0.31b	42.35±0.11d
T3	55.07±1.68c	15.53±0.40c	5.29±0.20c	39.17±1.21c	158.08±0.17a	47.35±0.45c
T4	60.77±0.81b	21.43±0.15b	6.12±0.03b	43.77±0.81b	149.11±0.33c	22.06±0.37e
T5	68.53±1.12a	24.83±0.61a	8.60±0.53a	48.70±1.32a	124.32±0.29d	8.82±0.18f

注:同一列不同小写字母不同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 different treatments ($P<0.05$). The same below.

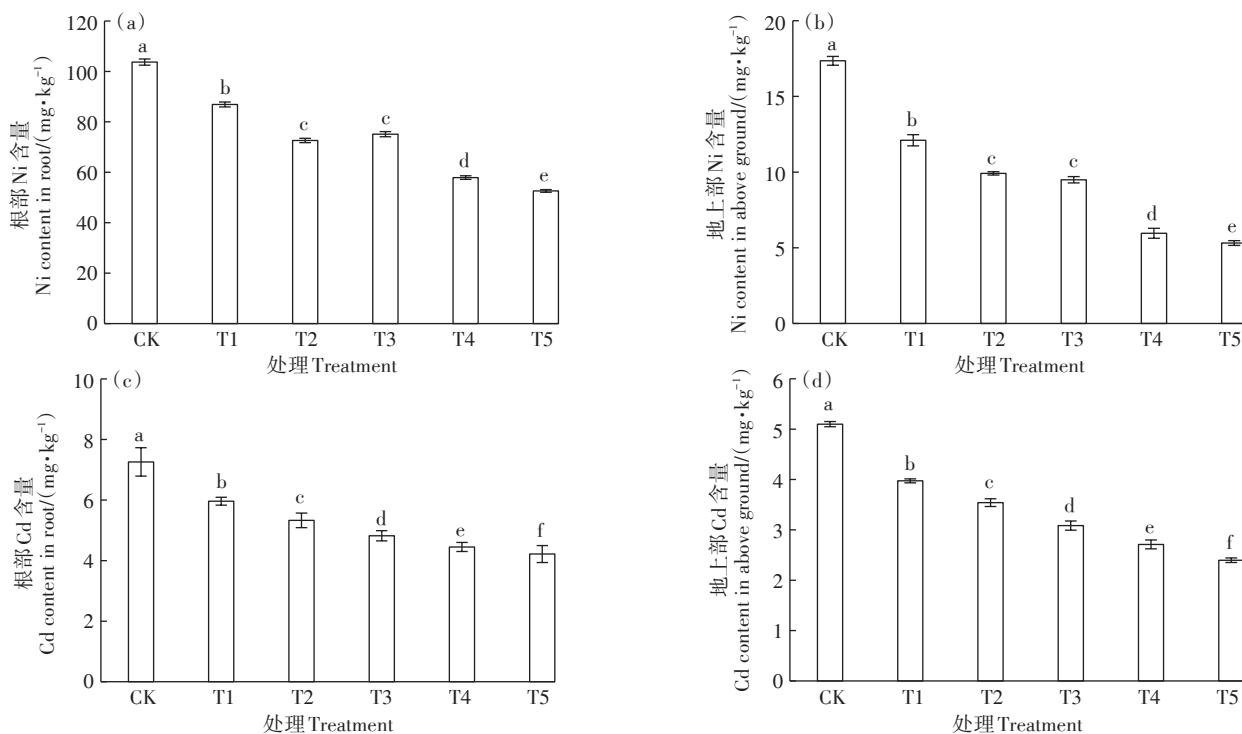


图2 修复对玉米幼苗Ni和Cd含量的影响

Figure 2 Effects of remediation on Ni and Cd contents in maize seedlings

分布比例之和分别增加了27.9%、19.2%，修复效果最显著。

2.6 不同修复处理对根际土壤微生物群落结构的影响

2.6.1 根际土壤微生物OTU分布

从图4可以看出,与CK相比,修复后根际土壤的细菌 OTU 总数增多了70.6%~97.0%,真菌 OTU 总数增多了176.2%~285.0%。各处理与CK共有的细菌 OTU 数目为1 289个,真菌 OTU 数目为133个,特有细菌的 OTU 数目增加了18.9%~70.8%,总体顺序为 T3>

T5>T1>T2>T4,特有真菌的 OTU 数目增加了1.8~2.8倍,总体顺序为 T5>T1>T2>T4>T3。

2.6.2 根际土壤微生物群落 Alpha 多样性指数

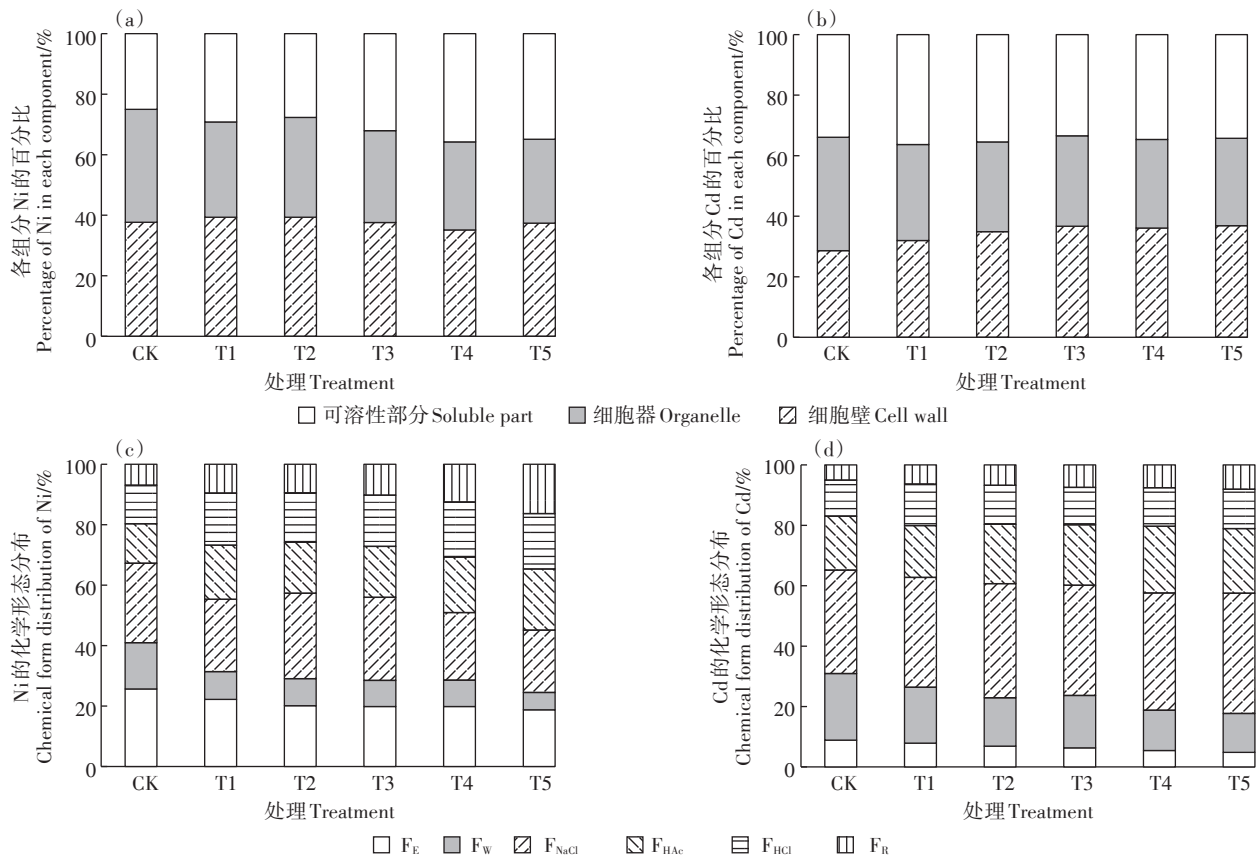
从表4可以看出,各处理改变了根际土壤的细菌群落 Alpha 多样性指数。与CK相比,各处理使Chao1、Shannon、Observed species 和 PD whole tree 指数均明显升高,其中T5处理的Chao1、Observed species 和 PD whole tree 指数相对其他处理最高。

从表5可以看出,与CK相比,不同处理使根际土

表3 修复对玉米幼苗根系形态的影响

Table 3 Effects of remediation on root morphology of maize seedlings

处理 Treatment	总根长 Total root length/cm	根投影面积 Root projected area/cm ²	根表面积 Root surface area/cm ²	根平均直径 Average root diameter/mm	根体积 Root volume/cm ³
CK	121.30±1.91f	4.21±0.18e	13.21±1.26f	0.35±0.02f	0.12±0.01e
T1	1 121.21±5.77e	27.21±0.23d	85.49±3.99e	0.50±0.04e	0.52±0.01d
T2	4 751.63±11.89d	119.19±0.62c	374.44±7.34d	1.27±0.08d	2.36±0.02c
T3	6 608.90±14.22b	162.19±0.81b	509.52±10.31c	2.16±0.05c	3.17±0.01b
T4	5 960.06±13.96c	170.27±0.45b	534.91±10.25b	2.35±0.03b	4.06±0.21a
T5	7 042.23±17.21a	180.86±0.42a	558.19±10.28a	2.83±0.07a	3.71±0.17a



F_E: 乙醇提取态; F_W: 去离子水提取态; F_{NaCl}: 氯化钠提取态; F_{HAc}: 醋酸提取态; F_{HCl}: 盐酸提取态; F_R: 残渣态
F_E: ethanol extraction form; F_W: deionized water extraction form; F_{NaCl}: Extracted state of sodium chloride; F_{HAc}: Acetic acid extraction form; F_{HCl}: Extraction form of hydrochloric acid; F_R: residual form

图3 修复对叶片 Ni 和 Cd 亚细胞和形态分布的影响

Figure 3 Effects of remediation on sub cellular and fractional distribution of Ni and Cd in leaves

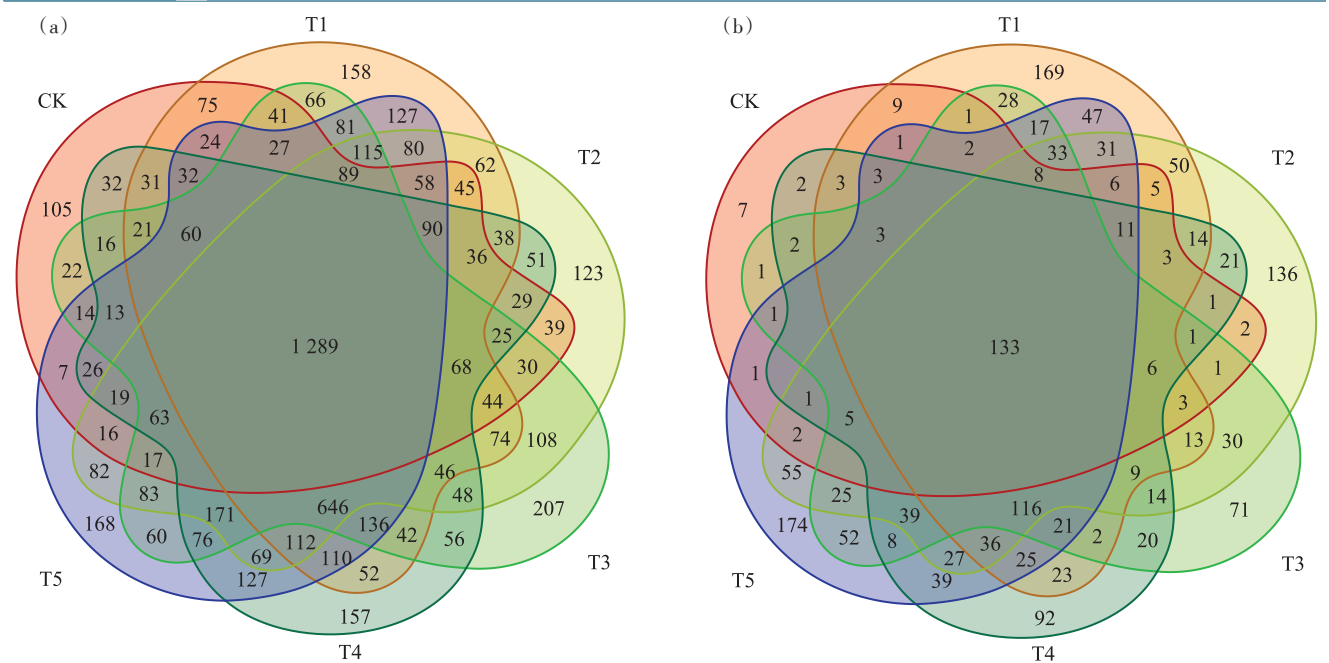


图4 修复对根际土壤细菌(a)和真菌(b)OTU分布的影响

Figure 4 Effects of remediation on OTU distribution of bacteria(a) and fungi(b) in rhizosphere soil

壤的真菌群落 Alpha 多样性指数均明显增长。其中,除 Chao1 的 T2 处理外,T5 处理的各项指数均高于其他处理。

2.6.3 不同修复处理对根际土壤微生物群落结构的影响

从图 5a 可以看出,细菌群落结构中的优势门为变形菌(Proteobacteria)、拟杆菌(Bacteroidota)、髌骨菌(Patescibacteria)、单胞菌(Gemmatimonadota)、放线菌(Actinobacteriota)、酸杆菌(Acidobacteriota),相对丰度之和占各处理总序列量的 85.7%~95.9%。与 CK 相比,复合菌和生物炭修复明显减少了变形菌(Proteobacteria)的相对丰度,增大了拟杆菌(Bacteroidota)的相对丰度,并且明显增加了根际土壤中后 6 个相对丰度较小细菌门在总序列量中的比例。

从图 5b 可以看出,各处理降低了根际土壤中未

表5 修复对根际土壤真菌群落多样性的影响

Table 5 Effects of remediation on fungal community diversity in rhizosphere soil

处理 Treatment	超 1 Chao1	香农 Shannon	物种丰富度 Observed specy	谱系多样性 PD whole tree	覆盖度 Coverage
CK	235.38	2.39	132.67	28.49	1.00
T1	637.34	5.47	496.20	89.55	1.00
T2	652.78	4.53	477.27	88.78	1.00
T3	547.17	2.76	376.00	70.05	1.00
T4	497.64	5.47	367.33	69.68	1.00
T5	649.95	5.93	512.00	91.75	1.00

被识别的菌(unidentified)的占比,并且显著提高了子囊菌(Ascomycota)、担子菌(Basidiomycota)、壶菌(Chytridiomycota)、被孢霉(Mortierella)和球囊菌(Glomeromycota)等真菌门在根际土壤中的相对丰度,提高了根际土壤优势真菌门的丰富度和均匀度。

2.6.4 根际土壤微生物群落相对丰度的变化和聚类分析

从图 6a 可以看出,不同处理均使土壤中大多数优势细菌在属水平上的相对丰度均呈现升高的趋势,显著增加了土壤中优势细菌属的数量和种类,但也有少量细菌属在修复后相对丰度降低,如酸球菌(*Acidipila*)、朱氏杆菌(*Chujaibacter*)、微小寄生菌(*TM7*)。

从图 6b 可以看出,在属水平上不同处理的根际土壤真菌群落结构与 CK 相比均存在较大的差异。各处理土壤中共检测到 20 个真菌属,CK 中检测到 4 个

表4 修复对根际土壤细菌群落多样性的影响

Table 4 Effects of remediation on bacterial community diversity in rhizosphere soil

处理 Treatment	超 1 Chao1	香农 Shannon	物种丰富度 Observed specy	谱系多样性 PD whole tree	覆盖度 Coverage
CK	2 344.33	5.79	1 416.60	155.63	0.98
T1	3 743.35	8.81	2 686.87	239.81	0.97
T2	3 710.30	7.53	2 522.90	229.36	0.97
T3	3 731.52	8.30	2 591.67	220.95	0.97
T4	3 458.02	8.09	2 417.53	219.67	0.97
T5	3 909.16	8.65	2 791.53	244.33	0.97

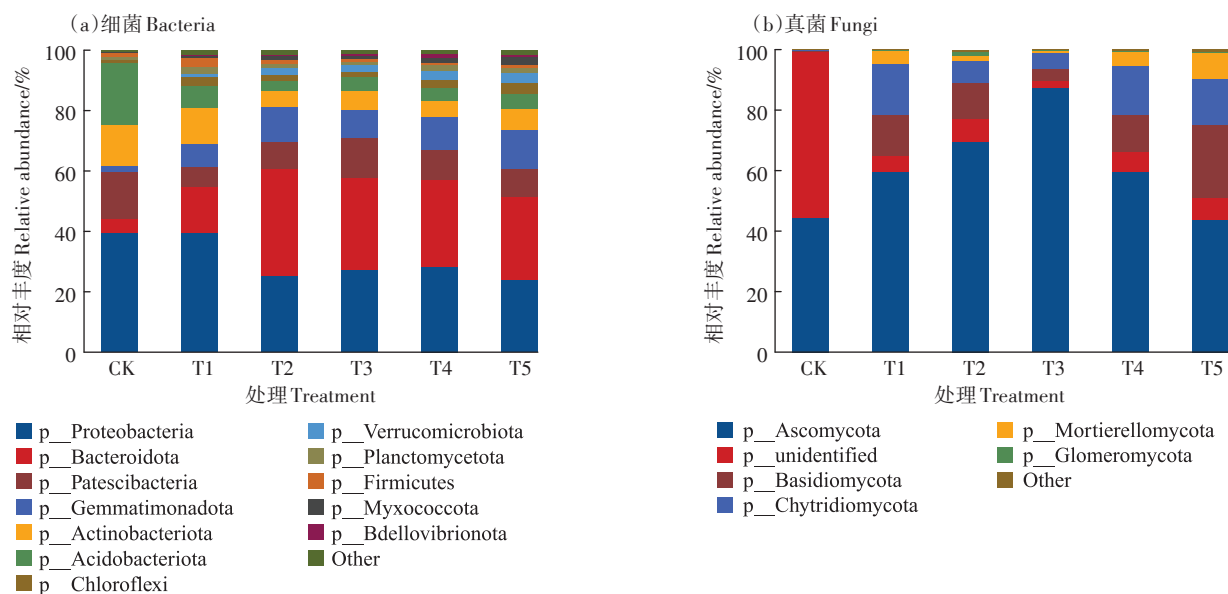


图5 门水平上根际土壤细菌(a)和真菌(b)的相对丰度

Figure 5 The relative abundance of bacteria(a) and fungi(b) in rhizosphere soil at phylum level

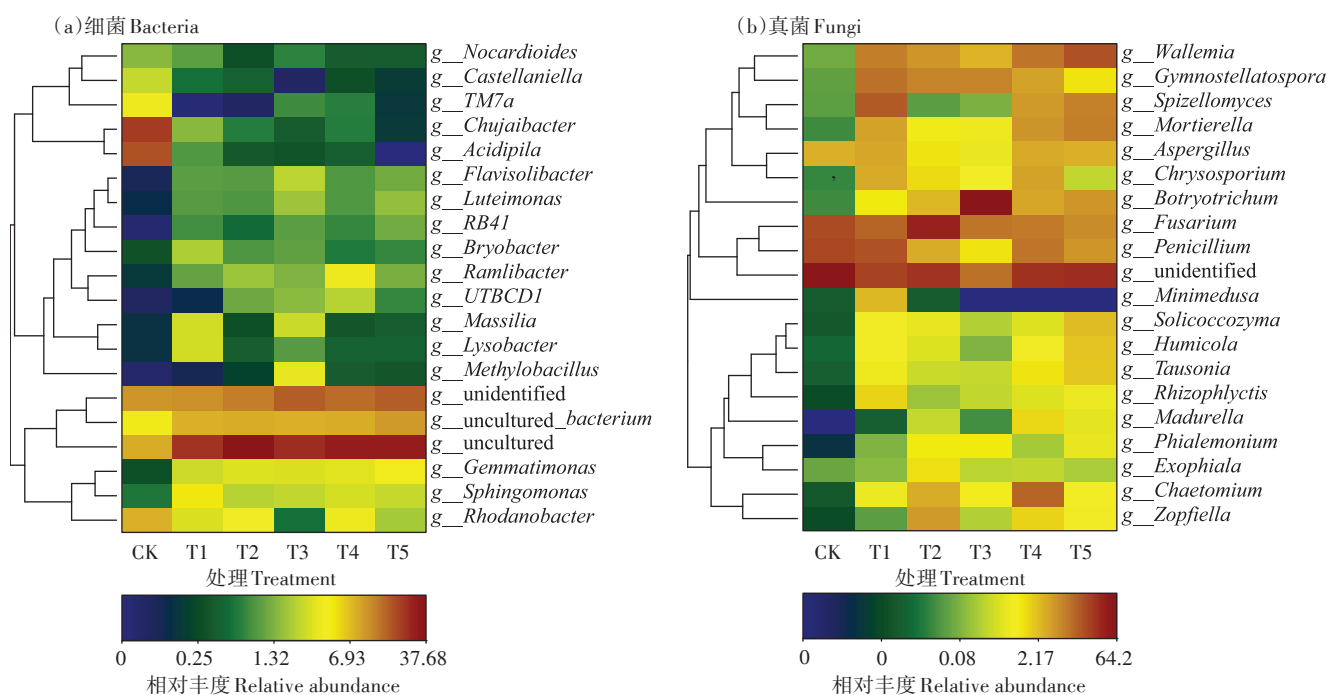


图6 属水平上根际土壤细菌(a)和真菌(b)的相对丰度聚类热图

Figure 6 The cluster heat map of relative abundance of bacteria(a) and fungi(b) in rhizosphere soil at genus level

相对丰度大于1%的真菌属,T1、T2、T3、T4、T5处理分别检测到16、14、10、15、17个相对丰度大于1%的真菌属,土壤中优势真菌属的数量和种类显著增加,但多孢霉菌(*Minimedusa*)在修复后相对丰度降低。

3 讨论

土壤Ni和Cd污染会严重影响作物生长发育并进入食物链,危害人体健康^[26-27]。研究表明利用具有

特定功能的微生物可对土壤重金属污染进行修复,MOHAMMADZADEH等^[28]研究发现沙福芽孢杆菌促进了高浓度Ni的土壤中向日葵根部、地上部的生长,显著缓解了Ni对植物生长的毒害作用。SHI等^[29]利用分离得到的丛毛单胞菌XL8减轻了Cd对水稻幼苗的影响。沙福芽孢杆菌N4和羧基酮丛毛单胞菌ZG2的单一菌株已被证实能够产植物促生物质IAA、铁载体并能够诱导形成碳酸盐沉淀,降低小白菜对Ni和Cd

的吸收^[18-19]。本研究利用二者的复合菌修复 Ni 和 Cd 污染土壤,发现利用复合菌可促进土壤中可交换态 Ni 和 Cd 向碳酸盐结合态转化,降低 Ni 和 Cd 的有效态含量,同时可促进玉米的生长发育,降低其对 Ni 和 Cd 的吸收,表明菌株 N4 和 ZG2 具有明显的联合修复作用。

近年来,生物炭在重金属污染修复方面得到了广泛应用^[30],研究发现施用生物炭能降低 Cd 对甜菜的毒性并降低其对 Cd 的吸收^[31];张艺腾^[20]利用鸡粪生物炭固定了土壤中的 Cu 和 Zn,减少小白菜对 Cu 和 Zn 的吸收;王雨琦等^[32]研究表明鸡粪生物炭促进了可交换态 Ni 和 Cd 向低毒害形态转化并促进了小白菜的生长。本研究发现鸡粪生物炭具有固定土壤中的 Ni 和 Cd 的作用,降低 Ni 和 Cd 对玉米幼苗的毒害,进而促进其生长发育,降低玉米对 Ni 和 Cd 的吸收,表明鸡粪生物炭在 Ni 和 Cd 污染土壤修复方面具有重要的应用价值。

有研究表明芽孢杆菌与生物炭具有良好的协同效应,复合使用利于重金属污染土壤的修复^[33];戚鑫等^[34]研究表明微生物与生物炭联合对 Cd 的去除作用大于单一微生物。本研究发现,复合菌和生物炭联合修复时效果大于单一修复,能在更大程度上促进土壤中可交换态 Ni 向碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态转化,可交换态 Cd 向碳酸盐结合态和残渣态转化,降低土壤中 Ni 和 Cd 有效态的含量;同时多方面促进了玉米幼苗生长,提升其抗氧化能力,显著增强了玉米次生根系的发育;降低了玉米对 Ni 和 Cd 的吸收;降低 Ni 和 Cd 在叶片细胞器的分布和叶片中迁移活性较强的高毒性形态 Ni 和 Cd 的比例。已有研究表明,通过调节重金属亚细胞水平上的选择性分布和重金属在植物体内的化学形态可以减弱重金属的毒害^[35-36]。此外,复合菌和微米生物炭联合修复的作用效果大于复合菌和生物炭联合,这可能是由于微米生物炭粒径较小,改善污染土壤理化性质的能力较强,有研究表明,与常规粒径的生物炭相比,颗粒较小的生物炭有利于改良土壤容重和田间持水量,对土壤物理性质有更强的积极影响,能够提升土壤质量,改善土壤结构^[37-38];并且因其比表面积较大,表面吸附位点较多,吸附性能较强,增强了对重金属的钝化能力,进而限制了重金属在土壤中的迁移,改善酸化土壤的 pH^[39]。

重金属污染会影响土壤中微生物的生长代谢反应,降低酶活性,抑制保护性基因的表达,可能造成土壤中微生物群落结构单一,致使土壤生态系统紊乱,减弱对外界环境胁迫的抵抗能力^[40]。有研究表明,在

重金属钝化过程中,土壤微生物群落代谢得到增强,因此能提高土壤中有益菌的数量,促进土壤与微生物的协同稳定^[41],本研究发现在门水平上,各处理增大了根际土壤中后六个相对丰度较小细菌门在总序列量中的比例,增加了常见优势真菌子囊菌、担子菌等真菌的相对丰度,子囊菌对重金属具有很强的耐受性,担子菌可以有效地转移重金属,其衍生物对土壤结构的稳定具有重要作用^[42],这表明复合菌和生物炭通过对 Ni 和 Cd 的修复固定,能够显著降低 Ni 和 Cd 污染对土壤微生物的毒害,提高了土壤微生物的生物量和多样性,促进了有益菌的生长繁殖。属水平上,各处理提高了土壤大多数优势细菌、真菌的丰度,但降低了细菌属中酸杆菌、朱氏杆菌、微小寄生菌及真菌属中多孢霉菌的丰度。酸杆菌是属于酸杆菌门的一类嗜酸菌,该类细菌丰度的降低可能与修复后土壤理化性质的改变有关^[43];朱氏杆菌是被归类于变形菌门黄单胞菌科的一类植物病原菌,其减少说明修复抑制了植物致病菌生长^[44];微小寄生菌是一种极小的需要寄生在宿主细菌表面进行生长和增殖的寄生细菌,同时对宿主细菌具有选择性,目前研究发现大多数微小寄生菌的宿主细菌为放线菌、酸杆菌^[45],因此酸杆菌的丰度降低也可能是导致其丰度降低的原因。多孢霉菌是一类抑制寄生植物的出苗率的植物致病真菌^[46],此类真菌减少也表明了复合菌和生物炭能够通过对 Ni 和 Cd 的修复固定促进了土壤中微生物菌群结构的改善,抑制了土壤中植物致病菌的存活,有助于植物抵抗病害。

4 结论

(1)沙福芽孢杆菌 N4 和 羧基壳聚糖 ZG2 组成的复合菌与鸡粪生物炭在单一和联合作用下对 Ni 和 Cd 污染土壤均具有不同程度的多重修复效应,作用大小顺序为复合菌联合微米生物炭>复合菌联合生物炭>微米生物炭>生物炭>复合菌。

(2)复合菌和微米生物炭的联合作用更大程度上促进了根际土壤中可交换态 Ni 和 Cd 向碳酸盐结合态等较稳定的形态转化,一方面降低了土壤 Ni 和 Cd 有效态含量,缓解了 Ni 和 Cd 对玉米生长发育和抗氧化能力的影响,降低了玉米对 Ni 和 Cd 的吸收;另一方面还可以实现土壤中碳的同步固定。

(3)复合菌和生物炭修复能使 Ni 和 Cd 污染土壤中细菌、真菌群落组成产生较大改变,增加土壤中细菌、真菌的数量和物种多样性,提高微生物群落结构

的丰富度和均匀度,并抑制植物致病菌的生长繁殖。

参考文献:

- [1] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014,29(3):315-320,350,272. ZHOU J J, ZHOU J, FENG R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3):315-320,350,272.
- [2] 周启星,李晓晶,欧阳少虎.关于“碳中和生物”环境科学的新概念与研究展望[J].农业环境科学学报,2022,41(1):1-9. ZHOU Q X, LI X J, OUYANG S H. Carbon-neutral organisms as the new concept in environmental sciences and research prospects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1):1-9.
- [3] ZHU X, LI W, ZHAN L, et al. The large-scale process of microbial carbonate precipitation for nickel remediation from an industrial soil[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219:149-155.
- [4] ZHAO Z J, ZHAO C L, DO H T, et al. *Brevibacillus laterosporus* ZN5 induces different carbonate precipitations of lead in ammonification and nitrate assimilation processes[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, 37(8):764-773.
- [5] PENG D, QIAO S, LUO Y, et al. Performance of microbial induced carbonate precipitation for immobilizing Cd in water and soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400:123116.
- [6] 王茂林,吴世军,杨永强,等.微生物诱导碳酸盐沉淀及其在固定重金属领域的应用进展[J].环境科学研究,2018,31(2):206-214. WANG M L, WU S J, YANG Y Q, et al. Microbial induced carbonate precipitation and its application for immobilization of heavy metals: A review[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2):206-214.
- [7] MOURA P A, FRANCELINO M R, SCHAEFER C E G R, et al. Distribution and characterization of soils and landform relationships in Byers Peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica[J]. *Geomorphology*, 2012, 155/156:45-54.
- [8] 任晓斌,白红娟,卫燕红,等.光合细菌和生物炭对污染土壤中铬的稳定化效果及小白菜生长的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(10):2141-2149. REN X B, BAI H J, WEI Y H, et al. Effects of photosynthetic bacteria and biochar on chromium stabilization in polluted soil and the growth of pakchoi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10):2141-2149.
- [9] MARYEM A, AQIB H A K, IMRAN H, et al. The reduction of chromium(VI) phytotoxicity and phytoavailability to wheat (*Triticum aestivum* L.) using biochar and bacteria[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114:90-98.
- [10] 贺旭红.生物修复和微生物矿化在重金属污染土壤处理中的研究进展[J].科技创新与应用,2018(23):66-68,71. HE X H. Research progress in bio-remediation and microbial mineralization in heavy metal contaminated soil treatment[J]. *Technology Innovation and Application*, 2018(23):66-68,71.
- [11] 郭军康,董明芳,丁永祯,等.根际促生菌影响植物吸收和转运重金属的研究进展[J].生态环境学报,2015,24(7):1228-1234. GUO J K, DONG M F, DING Y Z, et al. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on plants heavy metal uptake and transport: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7):1228-

1234.

- [12] ZHANG Y, REN J, WANG W, et al. Siderophore and indolic acid production by *Paenibacillus triticisoli* BJ-18 and their plant growth-promoting and antimicrobe abilities[J]. *PeerJ*, 2020, 8:e9403.
- [13] LI Z Y, MA Z W, VAN DER KUIJP T, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014(468/469):843-853.
- [14] 李想,龙振华,朱彦彦,等.东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2239-2248. LI X, LONG Z H, ZHU Y Y, et al. Zoning of cadmium and lead pollution for the safe production of facility leafy vegetables in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2239-2248.
- [15] 谢忠雷,王筱涵,李娜,等.吉林省耕地土壤重金属污染研究现状及展望[J].吉林农业大学学报,2018,40(4):457-462. XIE Z L, WANG X H, LI N, et al. Research status and prospects of heavy metal pollution in cultivated soils in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4):457-462.
- [16] 贾丽,刘建华,张璐,等.吉林省红旗岭和漂河川镍矿区耕地土壤重金属污染特征[J].吉林农业大学学报,2015,37(3):338-345,374. JIA L, LIU J H, ZHANG L, et al. Characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of the two nickel mines of Hongqiling and Piaohuchuan, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2015, 37(3):338-345,374.
- [17] TU C, WEI J, GUAN F, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil[J]. *Environment International*, 2020, 137:105576.
- [18] 龚诚君,周昕霏,杨映,等.产IAA菌与生物炭对镍和镉复合污染土壤的修复[J].环境科学与技术,2021,44(5):140-147. GONG C J, ZHOU X F, YANG Y, et al. Remediation of Ni and Cd contaminated soil by IAA producing bacteria and biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(5):140-147.
- [19] ZHOU X F, YANG Y, YIN Q X, et al. Application potential of *Comamonas testosteroni* ZG2 for vegetable cultivation in nickel and cadmium polluted soil[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23:101626.
- [20] 张艺腾.在不同条件下添加优良鸡粪生物炭对土壤化学特性的影响研究[D].长春:吉林农业大学,2018:15-17. ZHANG Y T. Study on the influence of chicken manure-derived biochar on soil chemical characteristics under different conditions[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018:15-17.
- [21] 李琪瑞,许晨阳,耿增超,等.纳米生物炭的制备方法比较及其特性研究[J].中国环境科学,2020,40(7):3124-3134. LI Q R, XU C Y, GENG Z C, et al. Preparation methods and properties of nanobiochars[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(7):3124-3134.
- [22] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSEON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-851.
- [23] 闫雷,朱园辰,陈辰,等.镉在黄瓜幼苗中的化学形态及亚细胞分布[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1864-1871. YAN L, ZHU Y C, CHEN C, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in cucumber seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1864-1871.
- [24] WANG Y, ZHANG X Y, CHEN J, et al. Reducing basal nitrogen rate

- to improve maize seedling growth, water and nitrogen use efficiencies under drought stress by optimizing root morphology and distribution[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212:328–337.
- [25] 张馨月, 王寅, 陈健, 等. 水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 34–44. ZHANG X Y, WANG Y, CHEN J, et al. Effects of soil water and nitrogen on plant growth, root morphology and spatial distribution of maize at the seedling stage[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2019, 52(1): 34–44.
- [26] 王丙烁, 黄益宗, 王农, 等. 镍污染土壤修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2392–2402. WANG B S, HUANG Y Z, WANG N, et al. Advances in research on remediation technology of nickel-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2392–2402.
- [27] 何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 340–344, 352. HE Z L, XIAN Y, MENG X X, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-contaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 340–344, 352.
- [28] MOHAMMADZADEH A, TAVAKOLI M, CHAICHI M R, et al. Effects of nickel and PGPBs on growth indices and phytoremediation capability of sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12): 1765–1778.
- [29] SHI Z J, QI X L, ZENG X A, et al. A newly isolated bacterium *Comamonas* sp. X1.8 alleviates the toxicity of cadmium exposure in rice seedlings by accumulating cadmium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123824.
- [30] 段然, 胡红青, 付庆灵, 等. 生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4836–4843. DUAN R, HU H Q, FU Q L, et al. Remediation of Cd/Ni contaminated soil by biochar and oxalic acid activated phosphate rock[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4836–4843.
- [31] 张海波, 闫洋洋, 程红艳, 等. 菌糠生物炭对土壤铅镉形态及甜菜生长的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 103–112. ZHANG H B, YAN Y Y, CHENG H Y, et al. Effects of spent mushroom substrate biochar on soil lead and cadmium forms and sugar beet growth[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(1): 103–112.
- [32] 王雨琦, 吴迪, 张秀芳, 等. 生物炭修复寒区镍和镉复合污染酸性土壤的多级筛选及其作用特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, DOI: 10.13254/j.jare.2021.0147. WANG Y Q, WU D, ZHANG X F, et al. Multi-stage screening of biochar and its effect on remediation of nickel and cadmium contaminated acidic soil in a cold region[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, DOI: 10.13254/j.jare.2021.0147.
- [33] JI X W, WAN J, WANG X D, et al. Mixed bacteria-loaded biochar for the immobilization of arsenic, lead, and cadmium in a polluted soil system: Effects and mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152112.
- [34] 戚鑫, 陈晓明, 肖诗琦, 等. 生物炭固定化微生物对U、Cd污染土壤的原位钝化修复[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1683–1689. QI X, CHEN X M, XIAO S Q, et al. *In situ* remediation of U- and Cd-contaminated soils by immobilized microorganisms and biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1683–1689.
- [35] 卞威尔斯, 闫家普, 崔良, 等. 施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1094–1101. BIAN W L S, YAN J P, CUI L, et al. The effect of selenium on cadmium accumulation, chemical forms and the resistance of peanuts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1094–1101.
- [36] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 286–294. XIONG S J, LIU J, XU W H, et al. Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 286–294.
- [37] LI Y Y, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil[J]. *Catena*, 2019, 173: 226–233.
- [38] 李佳轶, 刘文, 任天宝, 等. 植烟土壤物理特性及碳库对不同粒径生物炭的动态响应[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 14–23. LI J Y, LIU W, REN T B, et al. Dynamic response of tobacco planting soil physical properties and carbon pool to different biochar particle sizes[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2): 14–23.
- [39] SARFRAZ R, YANG W H, WANG S S, et al. Short term effects of biochar with different particle sizes on phosphorous availability and microbial communities[J]. *Chemosphere*, 2020, 256: 126862.
- [40] 李光炫, 石岸, 张黎明, 等. 不同粒径生物炭对土壤重金属钝化及细菌群落的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 583–592. LI G X, SHI A, ZHANG L M, et al. Effects of biochar with different particle sizes on soil heavy metal immobilization and bacterial community[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(3): 583–592.
- [41] IGALAVITHANA A D, LEE S E, LEE Y H, et al. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 593–603.
- [42] LIN Y, YE Y, HU Y, et al. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 557–564.
- [43] HUANG D L, LIU L S, ZENG G M, et al. The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 545–553.
- [44] KIM S J, AHN J H, WEON H Y, et al. *Chujaibacter soli* gen. nov., sp. nov., isolated from soil[J]. *The Journal of Microbiology*, 2015, 53(9): 592–597.
- [45] 聂杰, 陈宇星, 姜淞, 等. 解糖微小寄生菌的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(11): 1523–1531. NIE J, CHEN Y X, JIANG S, et al. Research progress of *Saccharibacteria*: A review[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2021, 51(11): 1523–1531.
- [46] RIDOUT M, NEWCOMBE G. *Sydowia polyspora* is both a foliar endophyte and a preemergent seed pathogen in *pinus ponderosa*[J]. *Plant Disease*, 2018, 102(3): 640–644.

(责任编辑:叶飞)