

生物炭和碳酸钙粉对高、低镉积累型水稻镉积累及根际微生物群落的影响

唐仲, 周明, 张隽, 赵方杰

引用本文:

唐仲, 周明, 张隽, 赵方杰. 生物炭和碳酸钙粉对高、低镉积累型水稻镉积累及根际微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2102-2110.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0263>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响](#)

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710-2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>

[农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究](#)

沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 许超, 何演兵, 黄道友

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1449-1454 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.003>

[连续施用改性生物质炭对镉铅土壤修复效果及其对微生物群落结构的影响](#)

杨素勤, 魏森, 张彪, 李焯楨, 张玉鹏, 马振华, 宁欣杰, 魏宏杨

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1460-1471 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1398>

[镉污染耕地大豆安全生产模式的探究](#)

王天宇, 陈睿, 施加春, 傅旭军, 徐建明, 何艳

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1629-1635 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0129>

[钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土](#)

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563-572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐仲, 周明, 张隽, 等. 生物炭和碳酸钙粉对高、低镉积累型水稻镉积累及根际微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2102-2110.

TANG Z, ZHOU M, ZHANG J, et al. Effects of biochar and calcium carbonate on cadmium accumulation and rhizosphere microbial communities in high- and low-cadmium accumulating rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2102-2110.



开放科学 OSID

生物炭和碳酸钙粉对高、低镉积累型水稻 镉积累及根际微生物群落的影响

唐仲, 周明, 张隽, 赵方杰

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为研究钝化剂对不同镉(Cd)积累特性水稻品种镉积累的阻控效果,采用盆栽试验,研究了2种钝化剂(生物炭和碳酸钙粉)处理下高、低镉积累水稻镉积累特性,同时考察了2种钝化剂添加对高、低镉积累水稻根际土壤pH、有效态镉含量和细菌群落结构的影响。结果表明:与对照相比,施加碳酸钙能分别提高低镉积累品种和高镉积累品种根际土壤pH 1.91和1.43,土壤有效态Cd含量分别降低了79.2%和65.2%;施加生物炭仅显著提升了低镉积累品种根际土壤pH 0.52,土壤有效态Cd含量降低了27.0%,而对高镉积累品种根际土壤pH和有效态Cd含量无显著影响;与对照相比,碳酸钙处理分别降低了低镉品种91.8%和高镉品种88.1%的籽粒Cd含量,而施加生物炭分别降低了低镉品种50.5%和高镉品种26%的籽粒中Cd含量。对收获期水稻根际微生物群落分析表明,生物炭主要影响根际细菌群落的丰度,而碳酸钙主要影响根际细菌群落多样性。以上结果表明,施用碳酸钙对于高、低镉积累型水稻籽粒镉积累均有较好的阻控效果,生物炭对低镉积累型水稻品种镉积累的阻控效果优于高镉积累型水稻品种,低镉积累水稻品种结合施用碳酸钙粉可在中轻度镉污染酸性土壤上推广应用以保障农产品安全。

关键词:重金属;镉污染;钝化剂;水稻;微生物群落

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)10-2102-09 doi:10.11654/jaes.2022-0263

Effects of biochar and calcium carbonate on cadmium accumulation and rhizosphere microbial communities in high- and low-cadmium accumulating rice cultivars

TANG Zhong, ZHOU Ming, ZHANG Jun, ZHAO Fangjie

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To study the inhibition effects of passivators on cadmium (Cd) accumulation in rice cultivars with different cadmium accumulation characteristics, pot experiments were performed to investigate the Cd accumulation in high- and low-Cd accumulating rice cultivars treated with two Cd passivators (biochar and calcium carbonate powder). In addition, the effects of passivators on rhizosphere soil pH, available Cd content, and bacterial community structure of high- and low-Cd accumulating rice cultivars were investigated. Compared with the control, the application of calcium carbonate (CaCO_3) could significantly increase the rhizosphere soil pH of the low- and high-Cd accumulating cultivar by 1.91 and 1.43, respectively, while the soil available Cd content decreased by 79.2% and 65.2%, respectively. The application of biochar significantly increased the rhizosphere soil pH of the low-Cd accumulating cultivar by 0.52 and decreased the soil available Cd content by 27%. No significant differences were observed for the rhizosphere soil pH and available Cd content of the high-Cd accumulating cultivar. Compared with the control, CaCO_3 treatment decreased the Cd content in grains of low- and high-Cd accumulating cultivars by 91.8% and 88.1%, respectively. The application of biochar reduced Cd content in grains of low and high-Cd accumulating

收稿日期:2022-03-21 录用日期:2022-04-25

作者简介:唐仲(1985—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为植物重金属积累阻控途径与分子机理。E-mail:tangzhong@njau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31972500)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31972500)

cultivars by 50.5% and 26%, respectively. The analysis of microbial community in rice rhizosphere soil at harvest time revealed that biochar mainly affected the abundance of bacterial community, while CaCO_3 mainly affected the diversity of bacterial community. The collective findings indicate that application of CaCO_3 was beneficial in decreasing Cd accumulation in both high- and low-Cd accumulating rice cultivars. The effect of biochar on decreasing Cd accumulation in low-Cd accumulating rice cultivars was better than that of in high-Cd accumulating rice cultivars. The combination of low-Cd accumulating rice cultivars and the application of CaCO_3 can be applied in medium and light Cd polluted acidic soils to ensure the safety of agricultural products.

Keywords: heavy metal; cadmium contamination; passivator; rice; microbial community

农作物是土壤重金属镉(Cd)进入人体的重要载体,与其他粮食作物相比,水稻对土壤中重金属Cd的富集能力更强^[1],因此,农田土壤Cd污染和水稻安全利用问题亟待解决。在所有土壤理化性质当中,土壤pH值是对Cd的生物有效性影响最大的因素之一,这主要是由于pH通过影响Cd的吸附-解吸来影响Cd在土壤固液相的分配^[2]。研究表明,Cd在酸性土壤环境中的溶解度会变大,其生物有效性也随之升高,更易被水稻等农作物吸收。陈宏坪等^[3]通过采集Cd含量不同的8个水稻产区的水稻土进行盆栽试验发现,水稻籽粒中Cd含量与土壤pH值呈现明显的负相关,pH值越高水稻籽粒中Cd含量越低。有机质含量对土壤中Cd有效性的影响主要体现在部分固相大分子对Cd的吸附作用。土壤中大分子的固相腐殖质和胡敏酸能够与Cd产生吸附、螯合作用从而使土壤中Cd的生物有效性降低^[4]。生物炭一般是以玉米秸秆、稻壳等富含有机质的农业废弃物为原料,在高温缺氧的条件下制成的稳定且碳含量较高的产物^[5]。向土壤中添加生物炭能够增加土壤中有机质含量,此外,生物炭多为碱性材料,其结构疏松,比表面积大且碳表面官能团丰富,能够降低土壤容重,增加吸附能力,这些特性决定了生物炭能够在一定程度上降低土壤中Cd的生物有效性^[5]。

水稻是一种较易富集Cd的农作物,不同水稻品种对Cd的吸收积累能力存在显著差异。有研究表明,籼稻吸收积累Cd的能力一般高于粳稻,而杂交稻与常规稻之间并无显著差异^[6]。DUAN等^[7]通过在华南三个中度污染地区种植471个适应当地环境的高产水稻品种试验发现,糙米中的Cd含量在不同种植条件下变化范围在10~32倍之间。曾翔等^[8]通过选取46个水稻品种进行Cd胁迫试验发现,这些品种糙米中Cd含量差值最大达到6倍。由此可见,不同的水稻品种对其吸收积累Cd也有着非常重要的影响。

施用土壤钝化剂作为农作物降Cd的重要措施,对Cd的生物有效性存在显著影响。目前应用土壤钝

化剂进行Cd污染农田的修复已被广泛报道^[9-10],但土壤钝化剂对于不同镉积累特性水稻的镉积累阻控效果存在差异。李翔等^[11]在田间条件下研究了5种钝化剂对土壤pH、Cd有效态含量以及对4个粳稻品种Cd积累的影响,发现降低土壤有效态Cd效果最优的钝化剂对4个水稻品种籽粒Cd含量降低率差异最大能达到25%左右。刘艳等^[12]在盆栽条件下比较了一种主要成分为CaO、MgO和SiO₂的自研钝化剂对3个籼稻品种Cd富集系数的影响,发现钝化剂对不同水稻品种的糙米Cd富集系数存在不同影响,且不同土壤条件下的影响不同。虽然以上报道发现钝化剂对不同水稻品种糙米Cd含量降低效果存在差异,但并未对其差异原因深入探讨。本研究通过开展盆栽试验,比较生物炭和碳酸钙粉分别应用于高、低镉积累型水稻对Cd积累的阻控效果以及对高、低镉积累水稻根际细菌群落结构的影响,以期Cd污染农田不同镉积累特性水稻安全生产过程中钝化剂的选择提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

盆栽试验所用土壤采自广东省韶关市樟市镇北约村农田表层土壤(0~20 cm),将土壤风干过筛后备用。供试土壤pH为5.33,有机质含量为21.73 g·kg⁻¹,土壤Cd含量为0.59 mg·kg⁻¹,超过了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。盆栽试验所种植的水稻品种为低镉积累品种深优957(SY957)和高镉积累品种甬优538(YY538)^[7]。本试验所用生物炭主要成分为稻壳、玉米秸秆等,购自南京勤丰众成生物质材料有限公司,该生物炭pH值为10.4,含碳量为576 g·kg⁻¹,含氮量为4.66 g·kg⁻¹,含磷量为5.33 g·kg⁻¹,含钾量为26.61 g·kg⁻¹,含镉量为0.13 mg·kg⁻¹,灰分含量37.4%。所用碳酸钙(CaCO_3 ,纯度为92.5%,100目,pH值为9.8,镉含量为0.11 mg·kg⁻¹)购自粤江新材料有限公司。

1.2 试验设计

盆栽试验共分3种处理:对照处理(CK)、生物炭处理(BC, $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)以及碳酸钙处理(CaCO_3 , $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),每种处理设置4盆重复,总计12盆。每盆用土5 kg,分别将每个处理所需的生物炭或碳酸钙与土壤充分混匀后一分为二加入同一个塑料桶中(高30 cm,直径32 cm),中间用300目尼龙网隔开,并使之保持淹水状态,稳定2周后备用。两种水稻种子在南京农业大学牌楼科研基地育秧池中进行育苗工作,待水稻幼苗长到三叶一心时,选择长势一致的两种水稻秧苗各一株移植于同一盆土壤中300目尼龙网两边。所有处理在水稻扬花期前始终保持盆栽土壤处于淹水状态,表层水深约2 cm,水稻扬花以后不再淹水,仅保证土壤湿润直至水稻成熟。

1.3 样品采集与测定

水稻收获时采集水稻根际1~2 mm范围内的根际土,具体操作参照刘波等^[13]的方法,先将植株从土壤中挖出,抖掉与根系松散结合的土体,然后将附着在根系表面1~2 mm范围的土壤用刷子刷下来作为根际土壤。取约0.5 g鲜土用于根际土壤微生物分析,其余土壤样品自然风干,研磨后过100目筛;土壤pH用蒸馏水按2.5:1(V/m)的水土比浸提,振荡10 min,静置30 min,采用台式pH计(Mettler-Toledo)测定;土壤有效态Cd以 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提;土壤样品、 CaCO_3 和生物炭均采用 HNO_3 -HCl法(1:4, V/V)、石墨消解炉(ED54, Lab Tech)消解。

采集每株水稻的根系和秸秆样品,用自来水冲洗干净后于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至质量恒定,粉碎后用 HNO_3 - HClO_4 法(87:13, V/V),石墨消解炉(ED54, Lab Tech)消解;采集每株水稻的稻穗样品于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至质量恒定,测定每个处理下水稻的单株产量、结实率以及千粒质量等农艺性状,籽粒脱壳粉碎后用 HNO_3 法,微波消解仪消解;土壤和水稻样品Cd含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION, Perkin Elmer)检测,选择GSS-14和GBW10015(国家标准物质网)分别作为供试土壤、水稻样品Cd含量的质量控制标准,标准物质的回收率为105%~113%。

1.4 土壤DNA提取与测序

采用试剂盒(FastDNA[®] Spin Kit for Soil, MP, Bio-medicals, USA)提取土壤总DNA, DNA溶液的质量和浓度采用NanoDrop 2000(Thermo, 美国)进行测定,提取好的DNA样品稀释10倍后于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存。并提取的基因组DNA为模板,采用16S V4~V5区引物(515F/

907R)扩增16S rRNA基因以鉴定细菌群落组成及多样性,高通量测序分析委托上海凌恩生物科技有限公司采用Illumina HiSeq 2500平台进行分析。利用usearch软件(<http://www.drive5.com/usearch/>)对所有有效序列进行聚类,默认以97%的一致性将序列聚类成为操作分类单元OTU(operational taxonomic units),进行Alpha多样性、Beta多样性分析。在门(Phylum)水平上将相对丰度小于1%的细菌类群和无法分类的细菌类群合并为“Others”。

1.5 数据处理与分析

本研究采用SPSS 18.0进行单因素方差(ANOVA)分析比较各处理间的显著性差异;采用Bray-Curtis距离及多变量统计学方法主坐标分析(PCoA, Principal coordinates Analysis)比较不同样品间细菌群落结构差异。

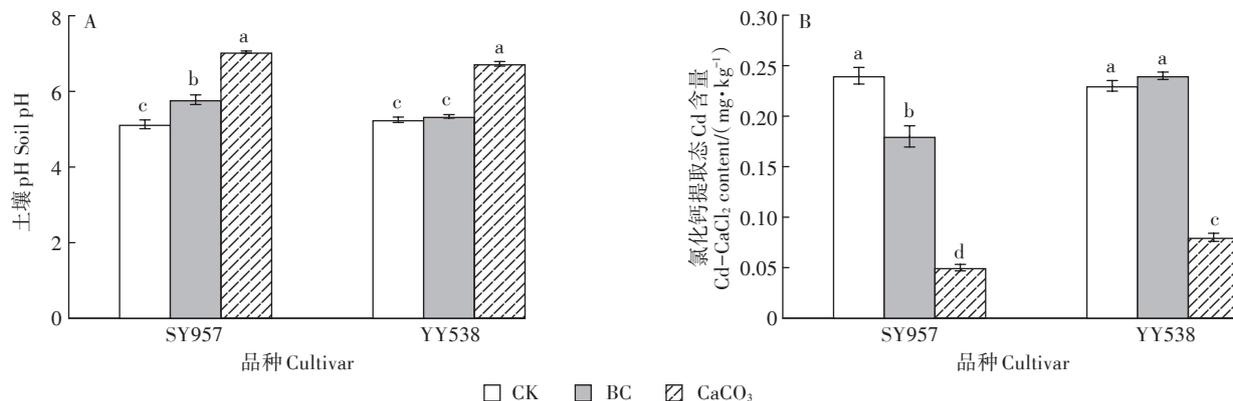
2 结果与分析

2.1 钝化剂对不同水稻品种根际土壤pH和有效态Cd的影响

水稻收获后对不同钝化剂处理下的水稻根际土壤pH和有效态Cd含量进行测定。如图1A所示,与对照处理相比,添加碳酸钙能显著增加水稻根际土壤的pH($P < 0.01$),深优957和甬优538水稻根际土pH分别为7.04和6.73,分别比对照处理提高了1.91和1.43。添加生物炭仅显著提高了深优957根际土壤pH,其pH从5.13提高到5.65,但是生物炭的添加对甬优538根际土壤pH未产生显著影响。对所有处理下根际土壤中有效态Cd进行测定发现,添加碳酸钙能极显著降低盆栽土壤中有效态Cd含量($P < 0.01$)(图1B),深优957和甬优538水稻根际土壤中有效态Cd含量分别从 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别降低了79.2%和65.2%。而添加生物炭仅显著降低了深优957根际土壤中有效态Cd含量,降低了27.0%,但是并没有对甬优538根际土壤中有效态Cd含量产生显著影响。

2.2 钝化剂对不同水稻品种根系、秸秆和籽粒Cd积累的影响

水稻收获后对水稻根系、秸秆以及籽粒中Cd含量进行测定,结果如图2所示。与对照处理相比,添加生物炭和碳酸钙均可以显著降低深优957根系所积累的Cd含量,与对照处理相比分别降低了44.9%和91.8%(图2A)。与对照处理相比,添加生物炭对甬优538根系积累Cd有显著影响,碳酸钙能极显著降



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters meant significant differences between different treatments at 0.05 level. The same below

图1 钝化剂处理对水稻根际土壤pH(A)及有效态Cd含量(B)的影响

Figure 1 Effects of different passivators on pH(A) and extractable Cd(B) in rhizosphere soil

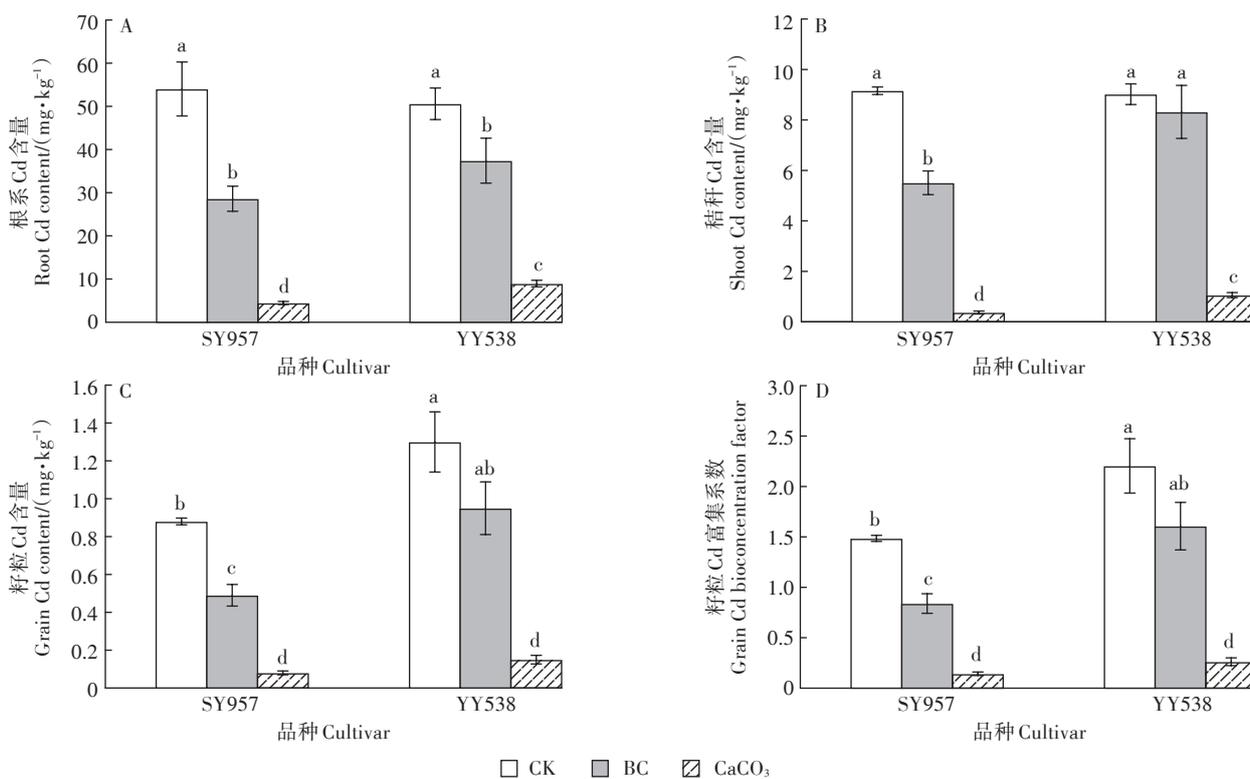


图2 钝化剂处理对不同积累型水稻根系(A)、秸秆(B)、籽粒(C)Cd积累和籽粒Cd富集系数(D)的影响

Figure 2 Effects of different passivators on roots(A), shoots(B), grain(C) Cd accumulation and grain Cd bioconcentration factor(D) in two rice cultivars

低甬优538根系积累的Cd含量($P<0.01$),从50.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到8.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低了82.3%。生物炭处理能显著降低深优957秸秆中Cd的积累,而对甬优538秸秆中Cd的积累无显著影响。与对照处理相比,碳酸钙处理均能显著降低两个品种秸秆中Cd的积累,将深优957和甬优538秸秆中的Cd含量分别降

低了95.8%和89.6%(图2B)。添加生物炭和碳酸钙均能够显著降低深优957籽粒中Cd含量($P<0.01$),与对照处理相比,添加碳酸钙将深优957籽粒中Cd含量降低了91.8%,添加生物炭将深优957籽粒中Cd含量降低了50.5%(图2C);碳酸钙处理中甬优538籽粒中Cd含量降低了88.1%,而生物炭处理中甬优538籽

粒中Cd含量虽然也有所降低,但差异不显著。碳酸钙处理两个品种水稻籽粒中Cd含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定的糙米Cd含量 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 限定值。对稻米Cd富集系数分析表明,生物炭处理显著降低了深优957籽粒Cd富集系数,而对甬优538籽粒Cd富集系数也有降低作用,但与对照处理相比差异不显著;碳酸钙处理均能显著降低两个品种籽粒Cd生物富集系数,且对籽粒Cd富集系数降低效果优于生物炭处理(图2D)。

2.3 钝化剂对不同水稻品种产量的影响

水稻收获后测定了不同处理下两种水稻的结实率与单株籽粒产量等农艺性状,结果如图3所示。与对照处理相比,不同钝化剂的添加均未对水稻的结实率和单株产量产生显著影响。深优957的结实率集中在 $66.2\% \sim 72.6\%$ 之间,单株产量集中在 $14.5 \sim 16.0 \text{ g}$ 之间;甬优538的结实率集中在 $65.9\% \sim 67.1\%$ 之间,单株产量集中在 $8.9 \sim 10.4 \text{ g}$ 之间。

2.4 钝化剂对不同水稻品种根际细菌群落的影响

2.4.1 对根际土壤细菌群落丰度及多样性的影响

α 多样性分析中Chao指数和Ace指数用来表征

物种的丰富度,Shannon指数和Simpson指数用来表征物种的多样性。Chao指数和Ace指数数值越大,表明微生物群落丰度越高。Shannon指数和Simpson指数数值越大,表明微生物群落多样性和均一性越好。如表1所示,对照条件下深优957根际微生物Ace、Chao、Shannon和Simpson指数均略高于甬优538,其中Ace指数达到显著水平。与对照处理相比,生物炭处理下深优957根际微生物Ace和Chao指数分别降低 20.2% 和 10.0% ,而甬优538根际微生物Ace和Chao指数无显著差异;生物炭处理下两个品种根际微生物Shannon和Simpson指数与对照处理相比均无显著差异。碳酸钙处理下深优957根际微生物Ace、Chao、Shannon和Simpson指数与对照处理相比分别降低了 24.4% 、 12.8% 、 9.8% 和 4.3% ,而甬优538根际微生物Chao、Shannon和Simpson指数与对照处理相比也均显著降低。

通过主坐标分析(PCoA)样本间的空间距离表示细菌群落结构的差异程度。结果表明(图4),水稻品种与钝化剂处理显著影响了水稻根际细菌群落结构,解释了 54.68% 的变异(PCoA1)。此外,对两个品种来说,碳酸钙和生物炭处理均是两种水稻根际细菌变

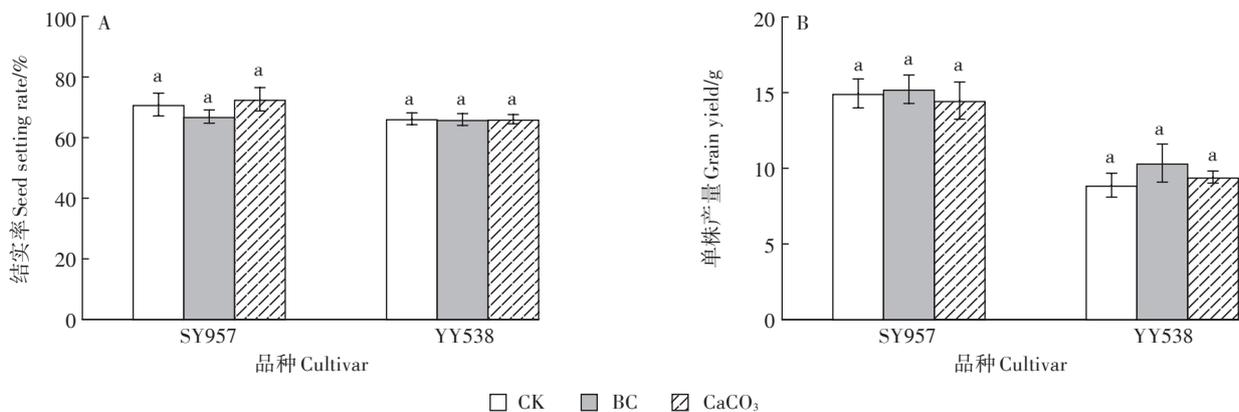


图3 钝化剂处理对不同积累型水稻结实率(A)和单株产量(B)的影响

Figure 3 Effects of different passivators on seed setting rate(A) and yield(B) of two rice cultivars

表1 钝化剂处理不同Cd积累型水稻根际细菌群落 α 多样性指标

Table 1 Alpha diversity index of bacterial community under different passivators

	SY957			YY538		
	CK	BC	CaCO ₃	CK	BC	CaCO ₃
Ace	10 831±278a	8 648±466b	8 187±542b	9 157±230b	8 870±481b	9 528±288b
Chao	2 774±86a	2 497±168b	2 419±192b	2 604±95a	2 680±95a	2 484±47b
Shannon	5.59±0.07a	5.47±0.24a	5.05±0.27b	5.49±0.13a	5.58±0.07a	4.9±0.20b
Simpson	0.99±0.001a	0.98±0.01a	0.94±0.02b	0.98±0.008a	0.99±0.002a	0.94±0.005b

注:小写字母表示同种指数不同处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters of the same row meant significant differences at 0.05 level between different treatments.

异的主要影响因素,解释了15.37%的变异(PCoA2)。在对照条件下,高、低镉积累品种间存在显著的根际微生物群落差异,但添加碳酸钙或生物炭处理降低了品种间的根际微生物群落差异。

2.4.2 对根际土壤细菌群落组成及群落结构的影响

本研究从3个处理下两水稻品种根际共获取7个相对丰度高于1%的门水平上的细菌类群(图5),分别是变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteria)和浮霉菌门(Planctomycetes),该7个优势细菌群落,占总细菌群落的70%以上。其中Proteobacteria相对丰度最高,占总细菌群落的54.6%~68.9%;

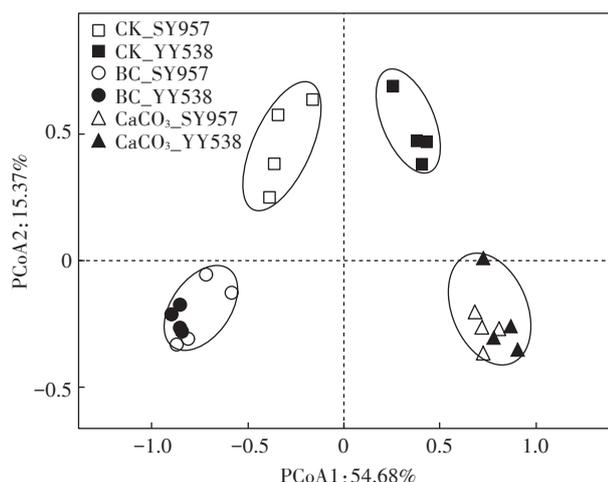


图4 钝化剂处理对不同积累型水稻根际细菌群落主坐标分析
Figure 4 Principal co-ordinates analysis of rhizosphere bacterial community of two rice cultivars treated with different passivators

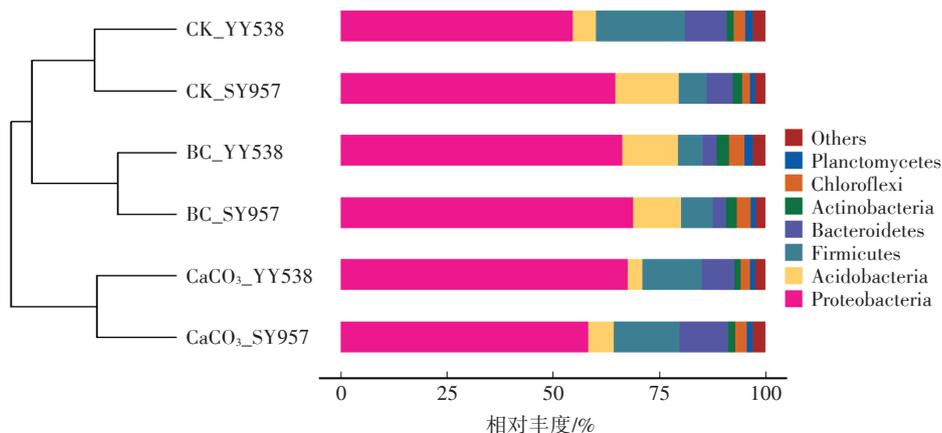


图5 钝化剂处理下不同积累型水稻根际细菌群落组成

Figure 5 Bacteria community composition in rhizosphere soil of two rice cultivars treated with different passivators

Acidobacteria其次,占总细菌群落的3.5%~14.9%。未添加处理条件下,深优957根际Proteobacteria、Acidobacteria和Actinobacteria丰度显著高于甬优538,而Firmicutes、Chloroflexi、Planctomycetes丰度显著低于甬优538。

在生物炭处理的样品中,与对照处理相比,深优957根际Proteobacteria、Chloroflexi、Actinobacteria丰度分别增加4.1%、1.5%、0.3%,而Acidobacteria和Bacteroidetes丰度分别降低3.7%和3.1%;甬优538根际Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi、Actinobacteria丰度分别增加11.7%、7.6%、0.8%、1.3%,而Firmicutes和Bacteroidetes丰度分别降低15.0%和6.7%。

在碳酸钙处理的样品中,与对照处理相比,深优957根际Firmicutes、Bacteroidetes、Chloroflexi丰度分别增加8.9%、5.4%、0.8%,而Proteobacteria和Acidobacteria丰度分别降低6.4%和8.9%;甬优538根际Proteobacteria丰度增加12.9%,而Acidobacteria、Firmicutes和Bacteroidetes丰度分别降低1.9%、7.0%和2.1%。

3 讨论

3.1 不同钝化剂对水稻根际土壤pH和有效态Cd的影响

水稻对Cd的积累与土壤中有有效态Cd含量具有显著相关性,因此施用土壤钝化剂后,土壤pH升高,土壤有效态Cd含量降低,是水稻镉积累降低的主要原因之一^[14]。3 g·kg⁻¹碳酸钙处理提高土壤pH和降低土壤有效态Cd含量的作用均显著强于生物炭处理。添加10 g·kg⁻¹生物炭仅显著提高了深优957根际土壤pH,并将其土壤中有有效态Cd含量降低了

27.0%,但是并没有对甬优538根际土壤pH及有效态Cd含量产生显著的影响。这可能与不同镉积累型水稻品种根系形态与根系分泌物的差异有关。一方面,有研究表明不同水稻品种根系分泌的有机酸含量具有显著差异,且受外界Cd胁迫的影响^[15]。本研究中Cd高积累水稻品种根系分泌物的酸化作用能够增加根际土壤中H⁺含量,从而降低根际土壤pH值,而添加生物炭能够提高土壤pH值,当生物炭添加量为1%时,二者作用可能相互中和抵消,从而导致其提高pH的效果不显著。另一方面,有研究表明高镉积累水稻品种根长、根表面积和根体积均显著高于低镉积累品种^[16],因此提升相同单位根际pH值所需生物炭量,高积累品种要高于低积累品种。此外,碳酸钙处理下,高积累水稻品种根际土壤有效态Cd含量依然显著高于低积累品种根际土壤有效态Cd含量(图1B),这也表明水稻根际土壤有效态Cd含量不仅与土壤pH值有关,而且与水稻品种有关。高镉积累型水稻品种具有更大的根表面积,更大的根表面积可以通过细胞壁中的果胶吸附结合更多的Cd^[16-17]。而高镉积累品种根系细胞壁对Cd的吸附-解吸作用可能是造成相同钝化剂处理下高镉积累品种根际土壤有效态Cd含量高于低镉积累品种根际土壤有效态Cd含量的原因^[18]。

3.2 不同钝化剂对高低镉积累水稻品种Cd积累的影响

本研究三种处理中,碳酸钙处理对两个水稻品种根系、秸秆以及籽粒中Cd含量降低效果均最为显著($P<0.01$),分别将深优957和甬优538根系、秸秆以及籽粒中Cd含量降低了91.8%和82.3%、95.8%和89.6%以及91.8%和88.1%,降低效率均在80%以上。其中,碳酸钙处理下深优957和甬优538籽粒中Cd含量分别为 $0.09\pm 0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.15\pm 0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均低于国家食品安全标准糙米中Cd限量指标 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2762—2017)。有研究表明,稻米Cd含量与土壤pH值呈极显著相关,将土壤pH值调控到6.5以上是降低稻米中Cd含量的有效途径^[19-20]。本研究利用碳酸钙将土壤pH值调控到6.5以上具有显著降低水稻籽粒Cd积累的效果,这与前人研究结果一致^[21]。也有研究表明,生物炭不仅通过提高土壤pH降低土壤Cd的有效性,而且通过表面的物理吸附和化学作用对土壤Cd进行钝化,降低土壤中Cd的有效性^[22-23]。本研究中添加 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭仅显著降低了深优957根系、秸秆以及籽粒中的Cd含量,和对照处理相比分别降低了47.1%、41.3%以及50.5%,但对甬优538根

系、秸秆以及籽粒中Cd含量并未产生显著影响,表明生物炭对水稻的降Cd效果受到不同镉积累型水稻品种的影响。已有研究表明根际溶液中的Cd主要通过水稻根系表皮细胞膜上锰、铁、锌等二价金属离子转运蛋白进入水稻体内^[24],且不同水稻品种对Cd的吸收积累存在广泛的遗传变异^[7],不同镉积累型水稻根系表皮细胞膜上Cd转运蛋白的表达量高低和对Cd的亲力和强弱差异可能是导致钝化剂对不同镉积累型水稻降Cd作用差异的主要原因之一。此外,生物炭和碳酸钙粉中的Cd含量均超过 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而本次盆栽试验中碳酸钙粉的用量远低于生物炭的用量,这也可能是碳酸钙处理的降Cd效果优于生物炭处理的原因之一。

对照处理下,深优957籽粒中Cd含量为 $0.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比甬优538籽粒中Cd含量低了33.1%,但仍然具有较高的Cd积累量。这与土壤中Cd浓度以及有效性有关,也与水分管理模式有关,本次盆栽试验为了更加明确体现出不同处理下的降Cd效果,在水稻扬花时就采用了湿润灌溉模式,即土壤表面无淹水仅保持土壤湿润,这会导致水稻吸收积累更多的Cd^[21,25]。也有研究者指出,湿润灌溉模式下Cd从水稻秸秆向籽粒中迁移的转运系数会比淹水灌溉模式的转运系数提高64.3%^[26]。另外,和对照处理相比,添加生物炭和碳酸钙均未对深优957和甬优538的结实率、单株产量产生明显影响,说明本研究中两种钝化剂处理措施在实际生产中具有较好的应用潜力。

3.3 不同钝化剂对高低镉积累品种根际细菌群落的影响

为进一步探讨不同土壤钝化剂对水稻根际细菌群落的影响,分析了根际细菌群落结构的变化。本研究发现低镉积累型水稻深优957根际细菌群落丰度显著高于高镉积累型水稻甬优538($P<0.05$),而两个品种间根际细菌多样性并无显著差异,这一方面表明低镉积累型水稻根际细菌数量多、代谢活性更强,另一方面也表明不同镉积累型水稻根系分泌物种类和数量存在差异。细菌群落 α 多样性分析表明,生物炭处理降低了低镉积累品种深优957根际细菌群落丰度,但对根际细菌多样性无显著影响,生物炭对高镉积累品种甬优538根际细菌群落丰度与多样性均无显著影响。生物炭处理对土壤微生物的影响是复杂且变化的,并且与生物炭的应用时间、类型和数量密切相关^[27-28]。碳酸钙处理均显著改变了两个品种水稻根际细菌群落丰度和多样性。总体而言,碳酸钙处

理对水稻根际生态环境的影响相对较大。

在门水平上,不同处理下高低镉积累型水稻根际优势菌门一致,这些优势菌门在重金属污染土壤中分布广泛^[29-30]。与对照处理相比,生物炭处理两个品种水稻根际 Proteobacteria 和 Chloroflexi 的丰度均显著增加。Proteobacteria 作为革兰氏阴性菌,其特征是细胞壁外存在一层能将金属从细胞外分离的脂多糖层,从而可以适应恶劣的污染环境^[31]。Chloroflexi 是一类以 CO₂ 为碳源通过光合作用产生能量的细菌^[32],该菌门丰度与土壤重金属含量呈负相关,因此该菌群属于重金属敏感菌群^[33-34]。本研究结果表明添加生物炭能调节根际微生物群落结构进而抵御恶劣的环境污染。有研究表明, Acidobacteria 和 Actinobacteria 在土壤中的丰度与有效态重金属含量呈正相关, Acidobacteria 和 Actinobacteria 的存在有利于植物对重金属的吸收^[35]。本研究中添加碳酸钙均显著降低了高、低镉积累型水稻根际 Acidobacteria 和 Actinobacteria 的相对丰度,表明水稻根际 Acidobacteria 和 Actinobacteria 这两类细菌类群丰度对水稻根际有效态 Cd 含量具有潜在指示作用。

4 结论

(1)施用碳酸钙对于高、低镉积累型水稻籽粒镉积累均有较好的阻控效果,而施用生物炭在不同镉积累特性水稻品种间的阻控效果存在差异;碳酸钙阻控水稻镉积累的效果优于生物炭,且用量少,成本低。

(2)不同镉积累型水稻品种的根际细菌群落结构存在显著差异,而生物炭和碳酸钙处理减少了不同镉积累型水稻之间根际细菌群落结构的差异,此外,碳酸钙处理降低了水稻根际细菌群落丰度和多样性,实际应用中可结合有机物料施用,以降低对根际土壤微生物群落的影响。

参考文献:

[1] 张燕,黄奇娜,邵国胜,等.水稻镉污染相关农艺调控技术研究与应用进展[J].中国稻米,2021,27(2):15-20. ZHANG Y, HUANG Q N, SHAO G S, et al. Advances in research and application of agronomic control technologies related to cadmium contamination in rice[J]. *China Rice*, 2021, 27(2):15-20.

[2] ZENG F, ALI S, ZHANG H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1):84-91.

[3] 陈宏坪,戴碧川,杨新萍,等.土壤与水稻籽粒镉含量相关性分析及水稻产地土壤镉临界值的研究[J].土壤,2018,50(2):361-368. CHEN H P, DAI B C, YANG X P, et al. Cadmium(Cd) threshold val-

ues of paddy soils to brown rice as determined by Cd concentrations in soils and rice grains as well as soil properties[J]. *Soils*, 2018, 50(2):361-368.

[4] GARCIA-MINA, JOSE M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12):1960-1972.

[5] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333. CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.

[6] SUN L, XU X X, JIANG Y R, et al. Genetic diversity, rather than cultivar type, determines relative grain Cd accumulation in hybrid rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:1407.

[7] DUAN G L, SHAO G S, TANG Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10(1):1-13.

[8] 曾翔,张玉焯,王凯荣,等.不同品种水稻糙米含镉量差异[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):67-69,83. ZENG X, ZHANG Y Z, WANG K R, et al. Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):67-69,83.

[9] 谢涛,徐立军,石一珺,等.钝化剂对酸性镉轻度污染土壤的修复效果[J].浙江农业科学,2021,62(12):2521-2524. XIE W, XU L J, SHI Y J, et al. Effect of passivator on remediation of cadmium contaminated acid soil[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(12):2521-2524.

[10] 蒋攀,王钰茜,赵钰婷,等.钝化剂对土壤重金属镉含量及其在川麦冬中累积的影响[J].中草药,2021,52(24):7638-7644. JIANG P, WANG Y Q, ZHAO Y T, et al. Effects of passivators on content of heavy metal cadmium in soil and its accumulation in *Ophiopogon japonicus*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(24):7638-7644.

[11] 李翔,杨驰浩,刘晔,等.钝化剂对农田土壤Cd有效性及不同水稻品种吸收Cd的研究[J].环境工程,2021,39(9):211-216. LI X, YANG C H, LIU Y, et al. Effect of passivators on Cd availability in farmland soil and Cd uptake by different rice varieties[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9):211-216.

[12] 刘艳,李慧,卢海威,等.1种钝化剂对3种水稻生长影响及降镉效果的研究[J].安全与环境学报,2019,19(1):290-299. LIU Y, LI H, LU H W, et al. Effect of a kind of passivator on growth of 3 rice varieties and cadmium reduction[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1):290-299.

[13] 刘波,胡桂萍,郑雪芳,等.利用磷脂脂肪酸(PLFAs)生物标记法分析水稻根际土壤微生物多样性[J].中国水稻科学,2010,24(3):278-288. LIU B, HU G P, ZHENG X F, et al. Analysis on microbial diversity in the rhizosphere of rice by phospholipid fatty acids biomarkers[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2010, 24(3):278-288.

[14] 江南,颜旭,周延彪,等.水稻镉积累影响因素与低镉稻米生产策略[J].中国水稻科学,2021,35(4):342-351. JIANG N, YAN X, ZHOU Y B, et al. Factors affecting cadmium accumulation in rice and strategies for minimization[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021,

- 35(4):342-351.
- [15] 唐杰, 徐浩洋, 王昌全, 等. 镉胁迫对3个水稻品种(系)根系生长及有机酸和氨基酸分泌的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2):118-124. TANG J, XU H Y, WANG C Q, et al. Effect of cadmium stress on root growth and organic acids and amino acid secretion of three rice varieties[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2016, 42(2):118-124.
- [16] 唐皓. 水稻镉高积累材料镉积累及耐性特征研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2016. TANG H. Cadmium accumulation and tolerance characteristics in high cadmium accumulating rice[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [17] YU H Y, WU Y, HUANG H G, et al. The predominant role of pectin in binding Cd in the root cell wall of a high Cd accumulating rice line (*Oryza sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 206:111210.
- [18] LI T Q, TAO Q, SHOHAG M J I, et al. Root cell wall polysaccharides are involved in cadmium hyperaccumulation in *Sedum alfredii*[J]. *Plant and Soil*, 2015, 389(1):387-399.
- [19] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):428-436. YI Y K, ZHOU Z B, CHEN G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):428-436.
- [20] 康六生. 土壤pH、淹水调控与低镉积累品种在水稻大田生产上的降镉效果[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(20):110-112, 128. KANG L S. Cadmium reduction effects of soil pH, flood control and low cadmium accumulation variety in rice field production[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(20):110-112, 128.
- [21] CHEN H, ZHANG W, YANG X, et al. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, 207:699-707.
- [22] 沈贤城, 司马小峰, 孟玉, 等. 两种秸秆生物炭对Cd的吸附特征研究[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(5):829-833. SHEN X C, SIMA X F, MENG Y, et al. Study on cadmium adsorption characteristics of two kinds of straw biochar[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(5):829-833.
- [23] 白珊, 倪幸, 杨瑗羽, 等. 不同原材料生物炭对土壤重金属Cd、Zn的钝化作用[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5):1199-1205. BAI S, NI X, YANG Y Y, et al. Immobilization of soil cadmium and zinc by different raw material derived biochars[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5):1199-1205.
- [24] 丁仕林, 刘朝雷, 钱前, 等. 水稻重金属镉吸收和转运的分子遗传机制研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5):383-390. DING S L, LIU C L, QIAN Q, et al. Research advances on molecular genetic mechanism for cadmium absorption and transportation in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(5):383-390.
- [25] 黄丹丹, 葛滢, 周权锁. 淹水条件下土壤还原作用对镉活性消长行为的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29:373-380. HUANG D D, GE Y, ZHOU Q S. Effect of redox processes on soil Cd activity under submerged conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29:373-380.
- [26] 崔晓炎, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2177-2184. CUI X Y, QIN J H, LI H S. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2177-2184.
- [27] 韩光明, 蓝家祥, 陈全球, 等. 生物炭对连作棉田细菌群落及代谢通路的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(6):736-742. HAN G M, LAN J X, CHEN Q Q, et al. Impact of biochar on bacterial community and metabolic pathway in continuous cropping cotton field[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, 52(6):736-742.
- [28] GAO L, WANG R, SHEN G M, et al. Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(4):884-896.
- [29] 李大乐, 陈建文, 张红, 等. 铜污染对土壤细菌群落结构及重金属抗性基因的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3):1082-1090. LI D L, CHEN J W, ZHANG H, et al. Effects of copper pollution on soil bacterial community structure and heavy-metal resistance genes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3):1082-1090.
- [30] CHODAK M, GOŁĘBIEWSKI M, MORAWSKA-PŁOSKONKA J, et al. Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64:7-14.
- [31] PEREIRA R M, SILVEIRA É L D, SCAQUITTO D C, et al. Molecular characterization of bacterial populations of different soils[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2006, 37(4):439-447.
- [32] KLATT C G, LIU Z, LUDWIG M, et al. Temporal metatranscriptomic patterning in phototrophic chloroflexi inhabiting a microbial mat in a geothermal spring[J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(9):1775-1789.
- [33] 江玉梅, 张晨, 黄小兰, 等. 重金属污染对鄱阳湖底泥微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11):3475-3486. JIANG Y M, ZHANG C, HUANG X L, et al. Effect of heavy metals in the sediment of Poyang Lake estuary on microbial communities structure base on Mi-seq sequencing[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(11):3475-3486.
- [34] 卞方圆, 钟哲科, 张小平, 等. 毛竹和伴矿景天对重金属污染土壤的修复作用和对微生物群落的影响[J]. 林业科学, 2018, 54(8):106-116. BIAN F Y, ZHONG Z K, ZHANG X P, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) intercropping with *Sedum plumbizincicola* and the impact on microbial community structure[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(8):106-116.
- [35] CUI H, LIU L L, DAI J R, et al. Bacterial community shaped by heavy metals and contributing to health risks in cornfields[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166:259-269.

(责任编辑:叶飞)