

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

引用本文:

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 等. 蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1723-1733.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同生育期施加超细磷矿粉对水稻吸收和转运Pb、Cd的影响

张青, 王煌平, 孔庆波, 栗方亮, 罗涛

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 45-54 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0607>

硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响

贺敏杰, 蔡昆争, 王维, 黄飞, 蔡一霞

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1651-1659 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0131>

生物炭对水稻根际微域土壤Cd生物有效性及水稻Cd含量的影响

张丽, 侯萌瑶, 安毅, 李玉浸, 林大松, 朱丹妹, 秦莉, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 665-671 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1363>

三种有机物料组成性质及其对土壤Cd形态与水稻Cd含量的影响

刘高云, 柏宏成, 叶碧莹, 魏世强

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1844-1854 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1461>

秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响

张庆沛, 李冰, 王昌全, 杨兰, 肖瑞, 郑顺强, 郭勇

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2345-2352 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0553>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 等. 蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1723–1733.

ZHANG Xiao-xu, ZHANG Jia-wei, SUN Xing-xing, et al. Effects of vermicompost on the migration and transformation of heavy metal cadmium in soil-rice systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1723–1733.



开放科学 OSID

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健*, 朱靖

(扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100)

摘要:为降低稻米中镉(Cd)含量,探究了牛粪源蚯蚓粪对水稻不同时期Cd吸收积累的影响。选取中性水稻土,采用盆栽试验,对牛粪源蚯蚓粪添加下水稻生长过程中土壤氧化还原电位(Eh)、pH和土壤Cd形态的变化规律及水稻重金属Cd积累量进行测定分析。结果表明:相较于对照(不添加蚯蚓粪),施加蚯蚓粪使水稻土壤Eh显著降低,显著降低水稻分蘖期土壤pH值,进入抽穗扬花期后无显著影响;蚯蚓粪的添加改变了土壤Cd的赋存形态,在分蘖期除低添加量 $6.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土外均显著降低环境活性态Cd含量,且添加量越大降幅越大,在水稻抽穗扬花期仅高添加量 $41.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土有显著降低效果,在完熟期各处理组均显著降低其含量;施加蚯蚓粪能显著降低水稻糙米中Cd的含量,蚯蚓粪施用量 $6.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土下糙米Cd含量降低48.08%,施用量达 $16.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土时糙米Cd含量降至 $0.157\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,符合国家稻米Cd控制标准,继续增加施用量后糙米Cd含量无显著差异。对于水稻植株,蚯蚓粪在 $41.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土下可显著降低全生育期各部位Cd含量,除抽穗扬花期茎部无明显规律外,其余各时期水稻根、茎及叶Cd含量均表现为蚯蚓粪添加量越大降低效果越明显。研究表明,蚯蚓粪在全生育期可通过降低土壤Eh影响土壤可交换态Cd含量从而降低水稻对Cd的吸收量。

关键词:蚯蚓粪;Cd;水稻;水稻土;积累

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)08-1723-11 **doi:**10.11654/jaes.2020-0110

Effects of vermicompost on the migration and transformation of heavy metal cadmium in soil-rice systems

ZHANG Xiao-xu, ZHANG Jia-wei, SUN Xing-xing, XU Yi-qun, XU Jian*, ZHU Jing

(School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: To reduce Cd content in rice and to explore the effect of vermicompost (CV) on Cd absorption and accumulation in different crops of rice, a pot experiment was carried out to investigate the effects of CV on soil Eh value, pH value, fractionation of Cd in paddy soils, and Cd content in rice grains. The results show that CV can significantly reduce the Eh value of paddy soil. Moreover, it considerably reduced the pH of paddy soil at the tillering stage of rice. However, it had no significant effect after the crop entered the heading stage. The addition of CV changed the fraction of Cd in the crop. In the tillering stage, the environmentally active Cd content decreased significantly, except for the low addition of $6.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil. The larger the amount of CV added, the greater the decrease of Cd. In the heading stage of rice, an added CV of $41.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil had a significant reduction effect, and in the ripening stage, the content of Cd in each treatment group decreased drastically. The addition of CV significantly reduced the content of Cd in brown rice. The content of Cd in brown rice decreased by 48.08% when CV of $6.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil was added. When the amount of CV was increased to $16.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, the Cd content of brown rice decreased to $0.157\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, meeting the national rice Cd control standard of less than $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. There was no significant difference in the content of Cd in brown rice among the groups with the increase in the amount of CV. The content of Cd in all parts of the rice plant decreased significantly in the whole growth period in $41.3\text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil. While the Cd content showed no obvious pattern in the

收稿日期:2020-01-31 录用日期:2020-04-01

作者简介:张晓绪(1994—),女,天津人,硕士研究生,主要从事重金属在环境中的迁移、转化研究。E-mail:EmoZhang@126.com

*通信作者:许健 E-mail:xujian_yz@163.com

stem of the rice plant in the heading stage, the content of Cd in the roots, stems, and leaves of rice in other growth periods showed that the greater the amount of CV, the more obvious the effect. During the whole growth period, CV reduced the content of exchangeable Cd in the soil by decreasing the soil Eh, consequently reducing the amount of Cd absorbed by rice.

Keywords: vermicompost; cadmium; rice; paddy soil; accumulate

随着工业化、城镇化进程的加快,工业“三废”和城市生活垃圾等污染向农村扩散,农田土壤重金属污染问题日益严重。据《全国土壤污染状况调查公报》显示,耕地土壤点位超标率为19.4%,其中Cd为首位主要污染物^[1],Cd污染耕地面积约占总耕地面积的1/6^[2]。詹杰等^[3]对近30年我国各地稻田Cd污染情况进行统计分析指出,Cd污染在长三角经济发达地区具有一定的普遍性,多分布在污灌区、工业区及乡镇企业周边,这些Cd污染稻田至今没有得到有效的修复并且仍然在进行农业生产。目前Cd污染治理途径主要有两种:去污染及稳定化^[4]。常用的工程措施有改土法、电动修复、淋洗络合等技术,但因其成本高、工程量大而无法广泛使用;植物修复富集容量有限、不易选择和培养,修复效率较差。目前应用田间管理措施施用无机、有机型等土壤改良剂是最具经济效益又操作简便的快捷有效手段。我国人口众多且以水稻为主要粮食作物,而水稻又是富集Cd的大宗谷类作物^[5],长期食用富含Cd的水稻会对人类健康构成严重威胁^[6]。因此,降低水稻Cd含量对保障人们身体健康具有重要意义。

相较于化肥,有机肥来源广泛、成本低廉^[7-8],能有效改善土壤性质,增强土壤水土保持及保肥缓冲的能力^[9]。诸多研究表明添加有机肥可以降低土壤中有效态重金属的含量,从而减少植物对重金属的吸收^[10-12]。但也有学者得出相反结果,汪月^[13]研究指出,施用稻草及猪粪堆肥两种有机物料均提高了水稻根际土壤中有效态Cd的含量。谭长银等^[14]、鲁洪娟等^[15]研究也指出施用畜禽有机肥会加重重金属污染风险。因此,有机肥的施用对水稻重金属积累的作用效果需进一步研究。蚯蚓粪是畜禽废物经蚯蚓堆肥后的产物,其具有良好的通气性和保水性^[16-17],阳离子交换能力与腐植酸含量增加,既是改良土壤重金属污染的修复剂,又是提高作物产量与品质的高效肥料^[18]。在我国大力倡导“减肥减药”及加强畜禽废弃物资源化利用的背景下,施用畜禽粪便源蚯蚓粪已成为绿色农业发展的趋势。徐慧婷等^[19]研究指出,蚯蚓粪及其生物炭可降低油菜食用部分Cd和Zn的含量,蔡永刚

等^[20]在中、高浓度Cd、Cu复合污染下施用蚯蚓粪显著降低了白菜Cd含量,纪艺凝等^[21]使用蒙脱土、海泡石两种无机物料与蚯蚓粪配施均大幅降低玉米籽粒Cd含量。但也有学者得出相反结果,Chand等^[22]研究表明土壤中 $2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 蚯蚓粪添加量促进了Ni及Cd在甘菊中的积累,冯萍等^[23]研究发现,蚯蚓粪配比大于50%会显著提高墨西哥玉米茎叶及根系中的Cu、Zn含量。因此,蚯蚓粪对于农作物重金属积累的作用效果有待进一步研究。

目前国内外关于蚯蚓粪对水稻作用的研究主要集中在增产及提高稻米品质方面^[24-25],但关于蚯蚓粪对水稻吸收重金属的影响研究较少。蚯蚓粪相较于普通有机肥具有较强的养分吸持能力,其含有大量的腐植酸及细菌、真菌等微生物群,表面积较大,其独特的物理、生物性质使之具有良好的吸收能力和钝化土壤重金属的潜能^[26]。基于此,本试验在高浓度Cd污染($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下,以南粳5505品种水稻为研究对象,探究蚯蚓粪对水稻生长过程中土壤Cd形态变化及水稻吸收积累Cd的影响,以期合理利用蚯蚓粪,降低水稻Cd含量提供科学依据,为国家粮食安全生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻:品种为南粳5505(*Oryza sativa*L. var. *nangeng* 5505)。

试验土壤:土壤采于扬州市广陵区沙头镇扬州大学某实验农牧场稻田耕作层(0~20 cm),去除石块、动植物残体等杂质,自然风干,研磨,过10目尼龙筛后用于盆栽试验。供试盆土壤基本理化性质见表1。

根据我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),土壤Cd的风险管控值为 $3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。添加 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液,使试验土壤Cd含量为重度污染 $5.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,充分混匀,于室温条件下陈化60 d后备用。

蚯蚓粪:选用奶牛粪源蚯蚓粪,由扬州大学试验农牧场蚯蚓养殖基地提供,经风干后研磨粉碎过20

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of the tested pot soil

pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail-K/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail-N/(mg·kg ⁻¹)	总镉 Total Cd/(mg·kg ⁻¹)
7.33	8.70	61.10	223.81	87.50	0.73

目尼龙筛备用,其有机质含量为432.5 g·kg⁻¹, pH 6.90,全Cd含量为0.41 mg·kg⁻¹。

1.2 试验方法

试验于2018年6月在扬州大学环境科学与工程学院进行。盆栽试验所用聚乙烯塑料盆高24 cm、内径22 cm。在水稻秧苗移栽前30 d每盆装土5 kg并施入基肥(1.0 g 尿素、0.815 g 磷酸二氢钾、0.275 g 氯化钾),淹水深度保持高于土壤界面2 cm状态,于2018年6月移栽秧苗,每盆3穴,每穴3株。蚯蚓粪作为一种有机物料,为便于与其他有机物料进行对比,其添加量以含碳量计,设6.3、16.3、26.3 g·kg⁻¹土和41.3 g·kg⁻¹土4个水平(添加蚯蚓粪后各处理组水稻土有机质含量为15、25、35 g·kg⁻¹和50 g·kg⁻¹),分别记为T1、T2、T3和T4,以不添加蚯蚓粪为对照(记为CK),共5个处理,每个处理3次重复,随机排列。水稻生长期间保持淹水3~5 cm,每周随机更换盆栽位置。根据水稻生长情况适时防治病虫害,水稻于2018年10月31日收获。

1.3 样品预处理及指标分析

分别于水稻分蘖期、抽穗扬花期和完熟期采集水稻植株和水稻土壤样品。从每盆水稻中随机选取3株植株,并连带根部土壤一并取出,带回实验室进一步处理。将水稻根部土壤于通风良好且干燥的室内环境中风干,磨细过100目尼龙筛,密封保存于干燥器中待测。植物样品用自来水洗净后再用去离子水冲洗,放入烘箱后在105℃杀青30 min,60℃烘干至恒质量。将水稻植株分为根、茎、叶、稻壳和糙米5部分,分别用万能粉碎机(天津泰斯特公司)粉碎后过100目尼龙筛,密封保存于干燥器中用于化学分析。

土壤基本理化性质测定参照《土壤农业化学分析方法》^[27]。

土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤pH采用电位法测定,Eh使用雷磁PHS-3C型精密ORP计原位测定。土壤有效态Cd采用DTPA(二乙三胺五乙酸)提取剂浸提后使用火焰原子吸收分光光度法(AAS,Solaar MK 2-M 6)上机测定。土壤Cd形态采用改进BCR法^[28]提取,分为可交换态、可还原

态、可氧化态及残渣态4种形态。根、茎、叶和籽粒中Cd含量采用干灰化法消解后用1% HNO₃定容、过滤。消解液及提取液中的Cd含量均使用ICP-MS(Elan DRC-e)测定。采用空白试验、平行样和标准物质进行质量控制,标准物质为标准土壤样品GBW07431、标准植物样品GBW10020(GSB-11)和标准大米样品GBW10043(GSB-21)。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2010进行数据处理,SPSS 19.0进行单因素ANOVA分析、相关性分析,Duncan法进行多重比较(差异水平为0.05),Origin 8.5绘图。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓粪施用对水稻土pH、Eh的影响

土壤pH变化如图1所示。可以看出,与CK组相比土壤添加蚯蚓粪后pH显著降低,且蚯蚓粪添加量越大降低越明显。前期各试验组土壤pH随水稻生长呈下降趋势,T1~T4处理组pH显著低于CK组,且T4与T1~T3处理组间存在显著差异。在水稻分蘖末期(移栽后第28 d)pH达到最低值,而后波动上升。进入水稻拔节期,水稻土壤pH仅T4处理组显著高于CK组。随着水稻抽穗扬花,各处理组土壤pH无显著差异。总体来看,各试验组土壤pH从水稻分蘖后期直至完熟期,pH一直在7左右波动。CK、T1、T2、T3、T4处理组的土壤pH平均值分别为6.96、6.98、6.97、7.00、6.99,各组间无显著差异。

从图1可以看出,淹水后,各试验组土壤Eh急剧下降,水稻分蘖期间CK、T1、T2、T3和T4处理组分别降低了71、154、164、142 mV和87 mV,至分蘖末期(水稻移栽后第28 d)T1~T4处理组Eh均低于-150 mV,显著低于CK组,且各处理组间也存在显著差异。水稻分蘖期结束后,各处理组Eh相对稳定,而CK组呈持续下降趋势。与CK组相比水稻抽穗扬花期T1~T4处理组均显著降低土壤Eh,但在中高蚯蚓粪添加量T2~T4处理组间无显著差异。随着水稻的生长,各处理组Eh始终显著低于CK组,但组间差异性消失。总体来看,T1、T2、T3、T4处理组土壤Eh平均值

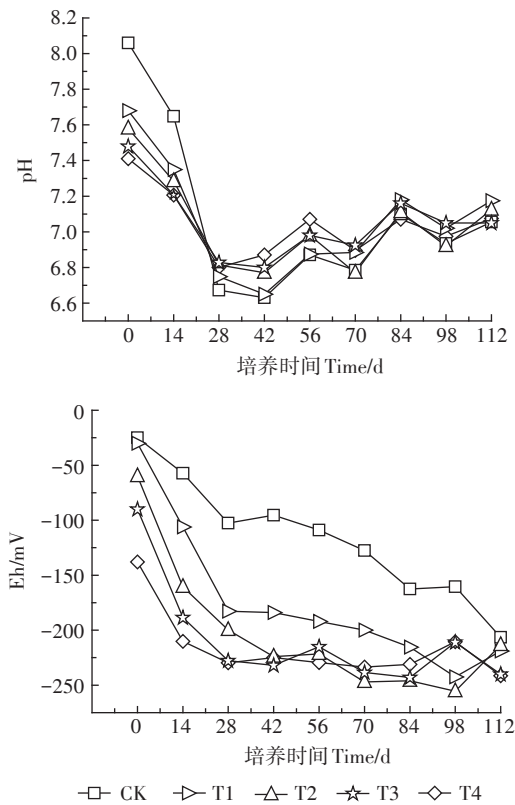


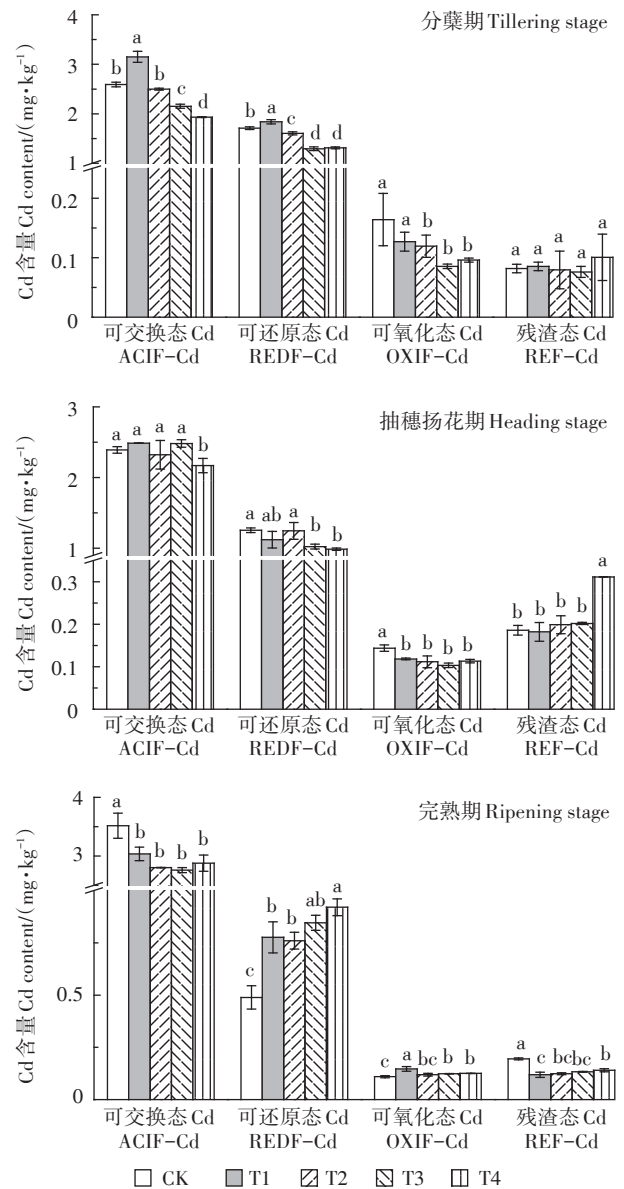
图1 蚯蚓粪对水稻土pH和Eh动态变化的影响

Figure 1 Effects of vermicompost on dynamic changes of pH and Eh in paddy soil

分别为-192.7、-221.0、-224.5、-226.3 mV,均显著低于CK组,表明外源添加蚯蚓粪显著降低了土壤Eh,但各处理组间降低效果无显著差异。

2.2 蚯蚓粪对水稻土壤Cd形态的影响

蚯蚓粪对水稻土壤Cd形态的影响如图2所示。在水稻完整生育期内,各试验组水稻土壤中Cd的存在形态均表现为可交换态>可还原态>可氧化态>残渣态。CK组可还原态和可氧化态Cd含量随着水稻生长均呈现下降趋势,降幅为71.4%和33.2%,可交换态呈先小幅下降后升高的变化趋势,总体增加了35.42%,残渣态Cd则增加了138.2%。T1~T4处理组可还原态Cd含量随水稻生长而下降,与CK组趋势相同。T1~T4处理组残渣态Cd含量在抽穗扬花期达到最高,随着水稻进入完熟期其含量有小幅降低,总体与CK组相同呈上升趋势。可交换态Cd含量在T1处理组下降3.7%,远小于CK组;在T2~T4处理组分别上升了12.2%、28.2%和49.1%,其中T2处理组在抽穗扬花期可交换态Cd含量有小幅下降(7.03%)。T1~T4处理组可氧化态Cd含量随水稻生长而增加,这种变化趋势在T3处理组表现最为显著,其增幅达



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2 蚯蚓粪对水稻土壤中Cd形态分配的影响

Figure 2 Effects of vermicompost on Cd fractionation in paddy soil

到了44.9%。

蚯蚓粪在水稻不同生长期对水稻土壤Cd形态的作用效果不同。在水稻分蘖期,与CK组相比可交换态及可还原态Cd均表现出“低促高抑”,即T1处理土壤可交换态及可还原态Cd含量显著高于CK组, T2~T4处理组则显著低于CK组。T2~T4处理组可氧化态Cd含量较CK组均有降低,但T2~T4处理组间无显著差异。残渣态Cd含量各试验组间均无显著差异。在水稻抽穗扬花期,蚯蚓粪对水稻土壤可交换态

及可还原态Cd的影响相似,即在低添加量下无显著影响,在高添加量(T4处理组)下显著降低其含量。T1~T4处理组可氧化态Cd含量与CK组相比均显著降低,但4个处理组间无显著差异。残渣态Cd含量仅在T4处理组下表现为显著增加,其余处理组均与CK组无显著差异。在水稻完熟期,蚯蚓粪对水稻土壤Cd形态影响效果显著。与CK组相比,T1~T4处理组可还原态及可氧化态Cd含量均显著升高(T2处理组下可氧化态Cd除外),可氧化态及残渣态Cd含量均显著降低。可交换态Cd含量在T1~T4处理组间无显著差异;可氧化态Cd含量在T1处理时增加效果最为明显,T2~T4处理组间无显著差异;与CK组相比,可还原态Cd含量随蚯蚓粪添加量的增加而显著升高;残渣态Cd含量的变化趋势与可还原态Cd相反,各处理组较CK组均显著降低,且添加量越小其降低效果越强。

2.3 蚯蚓粪对水稻植株各部位Cd积累的影响

2.3.1 蚯蚓粪对不同生育期水稻植株中Cd含量的影响

蚯蚓粪对不同生育期水稻植株各部位Cd含量的影响如图3所示。除抽穗扬花期T1处理的根部Cd含量高于CK组外,其余各处理组在各生育期的各部位Cd含量均显著低于CK组。在水稻完整生育期内,CK组水稻根、茎部Cd含量先下降后回升,总体含量呈降低趋势,叶片中Cd含量则呈现先下降后大幅上升的趋势,生育期结束时总体含量升高。与水稻分蘖期相比,抽穗扬花期时T2处理组茎和叶部分、T3处理

组根和茎及T4处理组全植株(根、茎、叶)Cd含量均升高,进入完熟期后降低。T1~T3处理组各部位Cd含量总体变化与CK组相同,水稻根、茎部分Cd含量均呈降低趋势,叶片中Cd含量呈升高趋势。T4处理组根、茎Cd含量总体呈升高趋势,与CK组相反,而叶片Cd含量变化趋势与CK组相同。

从Cd在水稻各部位的分布规律来看,在水稻分蘖期及抽穗扬花期,各试验组水稻Cd在各部位的积累量均表现为根>茎>叶,在水稻完熟期,高蚯蚓粪添加量(T4处理组)下Cd在各部位的积累量与CK组相同,表现为根>茎>叶,而T1~T3处理组则表现为根>叶>茎,与CK组存在差异。

2.3.2 蚯蚓粪对水稻植株中Cd分布的影响

由图3可以看出,添加蚯蚓粪对水稻各部位Cd含量均有显著影响,但不同时期、不同处理的影响不同。在分蘖期,添加蚯蚓粪后水稻根、茎和叶Cd含量均显著降低,且蚯蚓粪添加量越大Cd含量降低幅度越大。在抽穗扬花期,与CK组相比,T1处理组水稻根部Cd含量显著升高,而T2~T4处理组则显著降低,且T2~T4处理组间无显著差异。T1~T4处理组均显著降低水稻茎中Cd含量,其中以T2处理组效果最好,降低幅度达到67.8%。水稻叶片中Cd含量随蚯蚓粪添加量的增加而显著降低,T1~T4处理组分别较CK降低了15.03%、24.6%、50.0%和52.3%。在水稻完熟期,蚯蚓粪对水稻根、茎、叶Cd含量作用效果相同,均表现为随添加量增加降Cd效果加强,T4处理组水稻根、茎、叶

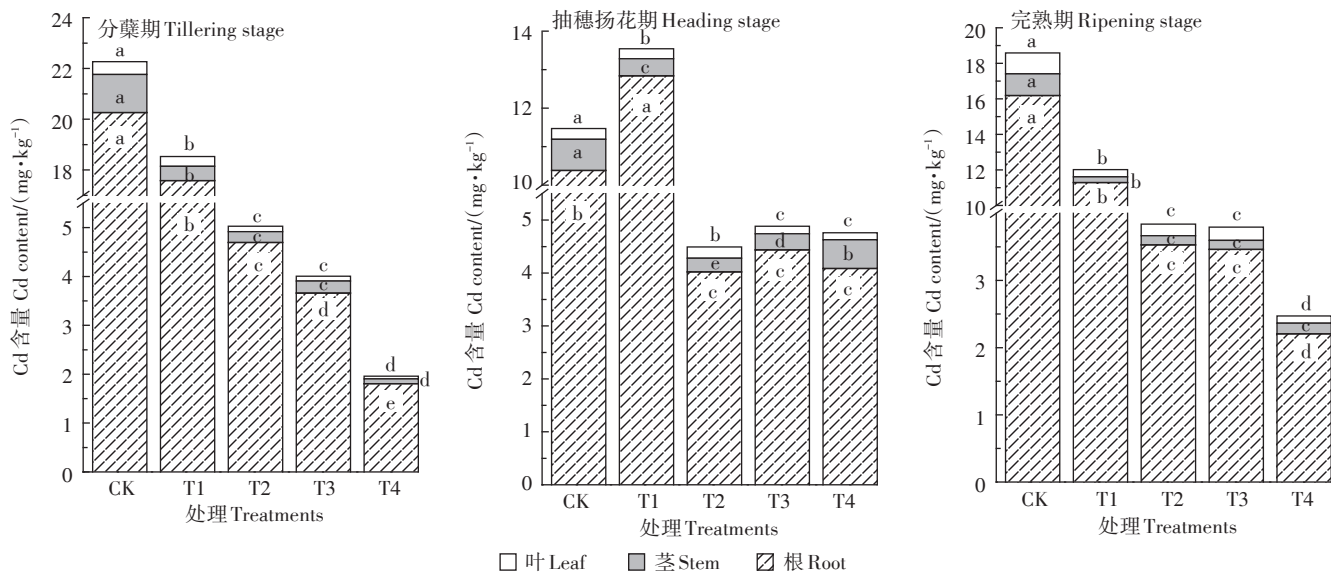


图3 不同生育期水稻各器官中Cd含量

Figure 3 Content of Cd in rice organs in different growth stages

表2 不同处理对水稻成熟期籽粒部分吸收Cd的影响
Table 2 Impact of different treatments on brown rice Cd uptake

处理 Treatments	稻壳 Shell		糙米 Brown rice	
	Cd/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline range/%	Cd/(mg·kg ⁻¹)	降幅 Decline range/%
CK	0.265±0.043a	0	0.617±0.030a	0
T1	0.130±0.037b	51.06	0.321±0.010b	48.08
T2	0.050±0.009c	81.12	0.157±0.013c	74.63
T3	0.055±0.014c	79.18	0.163±0.028c	73.67
T4	0.060±0.013c	77.28	0.137±0.027c	77.79

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$, respectively.

Cd含量较CK组分别降低了86.4%、87.0%和90.8%。
从糙米Cd含量降低幅度来看(表2),与CK组相比,蚯蚓粪可显著降低糙米中Cd含量,低蚯蚓粪添加量T1处理组糙米Cd含量降幅已达到48.08%,但尚未达到国家对糙米Cd的控制标准0.2 mg·kg⁻¹以下;T2处理组糙米Cd含量已降低至国家标准以下,蚯蚓粪添加量继续增加后,处理间无显著差异。蚯蚓粪对稻壳Cd含量作用效果与对糙米相似。

3 讨论

3.1 蚯蚓粪对水稻土的还原环境存在显著影响

Eh可代表土壤氧化性或还原性的相对程度,是土壤环境条件的一个重要综合指标^[29]。土壤pH控制着Cd的沉淀-溶解平衡^[30],也是影响土壤中Cd行为的重要土壤环境因子之一^[31]。淹水Eh低,土壤处于还原状态。本试验添加蚯蚓粪后进一步降低了土壤Eh,张燕等^[32]研究也发现,在淹水条件下添加秸秆生物炭显著降低土壤Eh。水稻中的氧化还原体系由氧、有机物质和铁锰氧化物组成^[33]。土壤淹水后空气中的氧气无法进入土壤,水稻土中的氧气含量骤降,土壤中其他组分的还原过程消耗大量电子,导致Eh迅速下降^[34]。蚯蚓粪施入后被快速分解,该过程会大量消耗土壤及淹水中的溶解氧,从而较CK组进一步降低了土壤Eh,且蚯蚓粪添加量越多消耗溶解氧越多,Eh降幅越大,还原程度越强。

蚯蚓粪在水稻分蘖期施入能显著降低水稻土pH,这可能是因为水稻根际分泌物及蚯蚓粪中富含的大量腐殖质在土壤中产生了有机酸^[35]。分蘖期结束后仅有高添加量处理对pH产生显著升高作用,随着水稻生长,各试验组间无显著差异,pH开始回升并向中性靠拢达到7左右,土壤胶体表面负电荷量增加,提高了土壤吸附Cd的能力;同时,土壤溶液中

OH⁻和多价阳离子浓度升高,有利于形成Cd(OH)₂沉淀,这提高了土壤对Cd²⁺的吸附力,使Cd向低活性态转化^[36]。此外,pH升高有利于Cd与腐植酸的络合及吸附作用^[37]。

3.2 蚯蚓粪可引起水稻土有效态Cd含量的变化

土壤Cd形态影响着Cd在环境系统中的迁移转化,决定着Cd的环境化学行为^[38]。BCR法将重金属形态分为4类,分别是可交换态环境活性形态、可还原态及可氧化态两种中等活性态及残渣态环境惰性形态。在本试验中,外源添加蚯蚓粪对Cd赋存形态有显著影响,尤其是可交换态和可还原态。在水稻分蘖期除低浓度蚯蚓粪添加量T1处理组外,其余处理组均显著降低了土壤中具备环境活性的可交换态、可还原态及可氧化态Cd含量,对残渣态Cd无显著作用;在抽穗扬花期仅高浓度蚯蚓粪添加量T4处理组显著降低了可交换态及可还原态Cd含量,而可氧化态Cd在T1~T4处理组均显著降低;在水稻完熟期T1~T4处理均显著降低了土壤交换态及残渣态Cd含量,而对可还原态及可氧化态Cd含量起到升高的作用。这与Liu等^[39]的研究结果一致。

有机物对土壤Cd赋存形态的作用有直接影响和间接影响两个方面。直接影响是指有机物料的分解产物与重金属离子发生广泛的反应,改变重金属在土壤固相-液相之间的分配,从而改变其存在形态。间接影响是指有机物通过改变pH、Eh等土壤性质而影响重金属的存在形态^[36]。对各时期水稻土壤Cd形态与土壤Eh、pH进行相关性分析(表3),分蘖期可交换态Cd与Eh呈显著正相关($P<0.05$),可还原态及可氧化态Cd与Eh呈极显著正相关($P<0.01$);抽穗扬花期土壤可还原态及可氧化态Cd与Eh均呈极显著正相关($P<0.01$);完熟期土壤可交换态Cd与Eh呈极显著正相关($P<0.01$),这表明土壤Eh的变化影响着土壤

中具有环境活性的Cd形态含量。添加蚯蚓粪后水稻土壤Eh下降至-200 mV左右,土壤处于强还原状态。田桃^[40]研究表明,土壤Eh为负值时,土壤Cd交换态含量与土壤Eh之间呈正相关关系,与本研究结果相同。土壤Eh降低,土壤中的高价态Fe、Mn离子被还原为Fe²⁺、Mn²⁺,形成的铁氧化物和铁锰氧化物对Cd²⁺有很大的吸附容量^[41],SO₄²⁻被还原为S²⁻,与Cd²⁺形成溶解性较低的沉淀^[42],从而显著降低土壤有效态Cd含量。蚯蚓粪中含有大量腐殖质^[26],腐殖质分子带有很多活性基团,其多孔性提供了大量吸附表面,是一种良好的吸附载体,对Cd产生强烈吸附作用的同时,腐殖质分子侧链上的一COOH、—C=O、—OH等含氧官能团与Cd发生螯合作用形成螯合物^[43]。此外,腐殖质的胶体性质使之能被各种电解质凝结,Cd²⁺可对腐殖质产生凝结作用,致使腐殖质的官能团解离而变成疏水胶体,造成可交换态Cd含量降低^[44]。本试验条件下,在水稻分蘖期除低浓度蚯蚓粪添加量T1处理

组外的各处理均显著降低土壤可交换态Cd含量,抽穗扬花期时T4处理组显著降低可交换态Cd含量,而在完熟期各处理组均显著降低土壤可交换态Cd含量,这与前人施用有机肥对水稻土Cd有效态的研究^[45-47]结果基本一致。将蚯蚓粪添加量与各时期土壤Eh、pH进行相关性分析得出(表4),在水稻分蘖期及抽穗扬花期,水稻土Eh与蚯蚓粪添加量呈极显著负相关($P<0.01$),完熟期水稻土Eh与蚯蚓粪添加量呈显著负相关($P<0.05$)。由此可以看出,蚯蚓粪添加量越高对土壤Eh的降低效果越显著。蚯蚓粪对土壤Cd有效态的影响作用主要是通过降低土壤Eh从而降低土壤具备高度活性及迁移性的可交换态Cd含量。而在水稻分蘖期低浓度添加量T1处理组时出现了土壤可还原态Cd含量升高的现象,这可能与蚯蚓粪DOM有关。有研究^[48]指出,蚯蚓粪DOM对土壤重金属离子存在活化作用。原本吸附在土壤上的Cd被蚯蚓粪小分子DOM替换,而在低浓度蚯蚓粪添加下Eh降低幅度小,未达到抑制Cd活性的还原程度,因此T1处理组可交换态Cd含量显著高于CK组。进入抽穗扬花期,随着Eh进一步降低,Eh降低Cd活性的主导作用发挥出来,使得T1处理组可交换态Cd含量降低至与CK组无显著差异。另外也有研究^[49-50]指出,有机物还能直接通过吸附作用、离子交换作用及基团配位作用促使土壤中形成有机结合态、铁锰氧化物结合态Cd,降低交换态Cd的比例,钝化土壤中的Cd降低其生物利用性,从而降低水稻根对土壤Cd的吸收富集作用。

3.3 蚯蚓粪显著影响水稻根、茎、叶及籽粒Cd含量

在本试验条件下,除抽穗扬花期T1处理组根部Cd含量显著高于CK组外,蚯蚓粪的施加显著降低了各时期水稻各部位Cd含量,各处理组对糙米Cd含量均有显著降低作用,T1处理组显著降低48.08%,T2~T4处理组间无显著差异,降幅均高于70%,表明施用蚯蚓粪对降低水稻Cd含量有较好的效果。为进一步探讨蚯蚓粪对各时期水稻各部位Cd含量的影响,将施用蚯蚓粪后的各时期土壤Eh、pH及Cd形态,与水稻各时期各部位Cd含量进行相关性分析。分析

表3 各时期水稻土壤Cd形态与土壤Eh、pH的相关性分析(n=15)
Table 3 Correlation between the fraction of Cd in soil and soil Eh, pH in each stage(n=15)

时期 Stage	项目 Item	Eh	pH
分蘖期 Tillering stage	可交换态 Cd	0.554*	0.082
	可还原态 Cd	0.697**	0.182
	可氧化态 Cd	0.828**	0.227
	残渣态 Cd	-0.278	0.029
抽穗扬花期 Heading stage	可交换态 Cd	0.222	-0.102
	可还原态 Cd	0.891**	-0.145
	可氧化态 Cd	0.875**	0.146
	残渣态 Cd	-0.413	0.139
完熟期 Ripening stage	可交换态 Cd	0.811**	-0.285
	可还原态 Cd	-0.688**	0.333
	可氧化态 Cd	-0.479	0.300
	残渣态 Cd	0.680*	0.070

注:*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$),ns表示无显著差异($P>0.05$),下同。
Note:*means the difference is significant at the 0.05 level,**means the difference is significant at the 0.01 level,ns means the difference is not significant. The same below.

表4 各时期蚯蚓粪添加量与土壤Eh、pH相关性分析(n=15)
Table 4 Correlation between the amount of vermicompost and soil Eh, pH in each stage(n=15)

项目 Item	分蘖期 Tillering stage		抽穗扬花期 Heading stage		完熟期 Ripening stage	
	Eh	pH	Eh	pH	Eh	pH
蚯蚓粪 Vermicompost	-0.782**	-0.478	-0.743**	-0.207	-0.676*	0.506*

表5 各时期水稻各部位Cd含量与土壤Eh、pH、Cd形态相关性分析(n=15)

Table 5 Correlation between Cd content in various parts of rice and soil Eh, pH, the fraction of Cd in each stage(n=15)

项目 Item	分蘖期 Tillering stage			抽穗扬花期 Heading stage			完熟期 Ripening stage				
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	稻壳 Shell	糙米 Brown rice
Eh	0.940**	0.960**	0.960**	0.679**	0.854**	0.697**	0.667**	0.984*	0.963**	0.927**	0.931**
pH	0.811	0.970**	0.855	-0.463	-0.228	-0.475	0.040	-0.398	-0.295	-0.201	-0.239
可交换态 Cd	0.785**	0.427	0.726**	0.373	-0.181	0.335	0.841**	0.912**	0.908**	0.912**	0.922**
可还原态 Cd	0.846**	0.579*	0.807**	0.272	0.225	0.720**	-0.823**	-0.889**	-0.911**	-0.903**	-0.838**
可氧化态 Cd	0.734**	0.771**	0.730**	-0.549*	0.828**	0.690**	-0.079	-0.457	-0.394	-0.293	-0.355
残渣态 Cd	-0.097	-0.105	-0.106	-0.535*	0.061	-0.672**	0.563*	0.865**	0.810**	0.721**	0.740**

结果得出(表5),各时期水稻各部位Cd含量均与土壤Eh呈极显著正相关。分蘖期水稻根及叶部分均与土壤可交换态、可还原态及可氧化态Cd呈极显著正相关($P<0.01$),水稻茎部与土壤可还原态Cd呈显著正相关($P<0.05$),与可氧化态Cd呈极显著正相关($P<0.01$);水稻抽穗扬花期茎部及叶片部Cd含量均与土壤可氧化态Cd呈极显著正相关($P<0.01$);完熟期水稻根、茎、叶、糙米及稻壳部分均与土壤可交换态Cd呈极显著正相关($P<0.01$)。这表明,土壤中可交换态Cd在水稻全生育期均是决定水稻积累Cd的重要因素,土壤中可交换态Cd含量越高,水稻植株各部位Cd含量越高。上文分析指出,Eh是影响土壤可交换态Cd的重要因素,付铄岚等^[51]研究发现,Cd由土壤转移到水稻籽粒中主要经历4个过程:土壤有效态Cd由载体进行转运、经根系吸收进入水稻后由木质部进行转载、Cd分配至茎部各茎节间、韧皮部将叶片中的Cd转移至籽粒中。薛毅等^[45]连续4年研究发现,分蘖盛期至齐穗期是双季稻米Cd积累的关键时期,降低这段时期土壤Cd有效性可阻控稻米Cd积累。蚯蚓粪在水稻全生育期降低植株各部位Cd含量可能是通过对水稻土壤Eh的显著降低作用从而改变土壤中Cd的形态构成,降低土壤中Cd的生物有效性,达到减少植株吸收Cd的效果。抽穗扬花期T1处理组水稻根部Cd含量显著高于CK组,可能是由于分蘖末期土壤可交换态Cd含量高,虽进入抽穗扬花期后土壤可交换态Cd含量有所降低,但是在生长过程中水稻根部已积累了部分Cd。T1处理组水稻根部Cd含量虽显著高于CK组,但水稻茎、叶部分均显著低于CK组,证明蚯蚓粪对抑制Cd在水稻中的转运也存在一定的作用。另外蚯蚓粪自身丰富的腐殖质还可以与Cd进行螯合作用,增强土壤对Cd的固持能力,从而进一步降低Cd向水稻植株中转移。蚯蚓粪中富含细菌和真菌等大量微生物类群,微生物对重金属的生

物吸附、富集及沉淀等行为都会降低重金属的植物有效性^[43]。

4 结论

(1)在本试验条件下,水稻土壤Eh随淹水时间延长呈下降趋势,蚯蚓粪的施加可显著降低土壤Eh,且蚯蚓粪添加量与水稻土Eh呈显著负相关关系。蚯蚓粪在水稻生长前期显著降低土壤pH,而后仅在高添加量41.3 g C·kg⁻¹土下显著升高土壤pH,最后在pH 7左右波动。

(2)蚯蚓粪对土壤Cd存在形态有显著影响,尤其是具备环境毒性的可交换态和可还原态。蚯蚓粪通过降低水稻土Eh影响土壤生物易利用态Cd,且高添加量41.3 g C·kg⁻¹土下,水稻全生育期均可显著降低镉含量。

(3)蚯蚓粪主要通过降低土壤可交换态Cd含量从而影响水稻对Cd的吸收。除抽穗扬花期6.3 g C·kg⁻¹土蚯蚓粪添加量下,其余蚯蚓粪处理在各时期均能显著降低水稻植株各部位Cd含量。蚯蚓粪添加量与植株Cd降低幅度之间除抽穗扬花期茎部Cd降低效果无明显规律外,其余各时期、各部位均表现为蚯蚓粪添加量越大降低效果越明显。

(4)蚯蚓粪对降低镉米风险、保障粮食安全生产有可以预见的良好效果。所有添加蚯蚓粪处理均能显著降低稻米中Cd含量,在高于16.3 g C·kg⁻¹土添加量下即可达到国家粮食卫生标准(0.2 mg·kg⁻¹)。蚯蚓粪通过降低土壤Eh减少生物可利用态Cd,从而抑制Cd从土壤系统向水稻系统的迁移,同时抑制水稻系统中Cd由根部向茎叶部的转运。蚯蚓粪虽然在高于16.3 g C·kg⁻¹土添加量下能进一步降低植株Cd含量,但对糙米Cd含量已无显著影响。以降低稻米Cd含量为目的,从经济效益角度出发蚯蚓粪添加量不需过高。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 2014年全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, 36(5):1689-1692.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. 2014 national soil pollution status survey bulletin[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, 36(5):1689-1692.
- [2] 彭伟东. 农田土壤镉污染现状与修复技术[J]. 云南化工, 2019, 46(3):88-89, 92.
PENG Wei-dong. Present situation and remediation technology of cadmium pollution in farmland soil[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(3):88-89, 92.
- [3] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7):1257-1263.
ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7):1257-1263.
- [4] 张佳. 农田土壤Cd污染与治理的研究现状[J]. 农业科技与装备, 2016(6):8-10.
ZHANG Jia. Research status on Cd pollution and treatment in farmland soil[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2016(6):8-10.
- [5] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biorrtals*, 2004, 17:549-553.
- [6] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2):692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):692-703.
- [7] Farrell M, Perkins W T, Hobbs P J, et al. Migration of heavy metals in soil as influenced by compost amendments[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1):55-64.
- [8] Bolan N S, Duraisamy V P. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: A review involving specific case studies[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(3):533-555.
- [9] 王元元, 李超, 刘思超, 等. 有机肥对水稻产量、品质及土壤特性的影响研究进展[J]. 中国稻米, 2019, 25(1):15-20.
WANG Yuan-yuan, LI Chao, LIU Si-chao, et al. Research advances on effects of organic fertilizer on yield, quality of rice and soil characteristics[J]. *China Rice*, 2019, 25(1):15-20.
- [10] 张琴. 连续施用有机肥对冬小麦和高粱吸收重金属的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009:45-50.
ZHANG Qin. Effect of continuous application of organic fertilizer on heavy metal absorption of winter wheat and sorghum[D]. Cuiyang: Guizhou University, 2009:45-50.
- [11] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 等. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2):383-388.
ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effects of organic amendments on the growth and heavy metal uptake of rice on a contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):383-388.
- [12] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3):826-832.
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):826-832.
- [13] 汪月. 有机物料对水稻土铁形态及水稻镉吸收的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019:39-40.
WANG Yue. Effects of organic materials on iron morphology in paddy soil and cadmium absorption in rice[D]. Chongqing: Southwest University, 2019:39-40.
- [14] 谭长银, 吴龙华, 骆永明, 等. 不同肥料长期施用下稻田镉、铅、铜、锌元素总量及有效态的变化[J]. 土壤学报, 2009, 46(3):412-418.
TAN Chang-yin, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Variations of total and availability Cd, Pb, Cu and Zn in red paddy soils under long term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3):412-418.
- [15] 鲁洪娟, 马友华, 樊霆, 等. 有机肥中重金属特征及其控制技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12):2022-2030.
LU Hong-juan, MA You-hua, FAN Ting, et al. Research progress on characteristics of heavy metals in organic manure and control technology[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(12):2022-2030.
- [16] Edwards C A, Burrows I. Potential of earthworm composts as plant growth media[M]//Edwards C A, Arancon N Q. Earthworms in waste and environmental management. Netherlands: SPB Academic Press, 1988.
- [17] Atiyeh R M, Edwards C A, Subler S, et al. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: Effects on physicochemical properties and plant growth[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78(1):11-20.
- [18] 刘大伟, 陈井生, 王芳, 等. 蚯蚓粪在农业生产中的应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(14):8-11.
LIU Da-wei, CHEN Jing-sheng, WANG Fang, et al. Research advances of vermicompost used in the field of agriculture[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(14):8-11.
- [19] 徐慧婷, 吕纪康, 张伟文, 等. 蚓粪及其生物炭农用对土壤-蔬菜系统中Cu/Zn阻控效应差异[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2019, 18(2):146-152.
XU Hui-ting, LÜ Ji-kang, ZHANG Wei-wen, et al. The retarding effect on Cu/Zn in soil-vegetable system with vermicompost and its biochar[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 18(2):146-152.
- [20] 蔡永刚, 郭志瑶, 李梦雅, 等. 蚯蚓粪、牛粪对镉铜复合污染土壤中白菜生长和镉铜积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9):452-455.
CAI Yong-gang, GUO Zhi-yao, LI Meng-ya, et al. Effects of earthworm manure and cow manure on the growth of cabbage and accumulation of cadmium and copper in Cd Cu contaminated soil[J]. *Jiangsu*

- Agricultural Science*, 2016, 44(9):452-455.
- [21] 纪艺凝, 王农, 徐应明, 等. 无机-有机复配材料对Cd污染土壤的修复效应[J]. 环境化学, 2017, 36(11):2333-2340.
- JI Yi-ning, WANG Nong, XU Ying-ming, et al. Effect of inorganic-organic compound mixtures on the immobilization remediation of Cd contaminated soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(11):2333-2340.
- [22] Chand S, Pandey A, Patra D D. Influence of vermicompost on dry matter yield and uptake of Ni and Cd by chamomile (*Matricaria chamomilla*) in Ni- and Cd-polluted soil[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2012, 223(5):2257-2262.
- [23] 冯萍, 郭丹, 姚武, 等. 蚓粪配比对墨西哥玉米生长及重金属积累特性的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2012, 11(5):403-406, 409.
- FENG Ping, GUO Dan, YAO Wu, et al. The effects of vermicompost proportion to the growth and heavy metal accumulation of *Euchlaena Mexicana*[J]. *Schrad. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 11(5):403-406, 409.
- [24] Taheri R E, Ansari M H, Razavi N A. Influence of cow manure and its vermicomposting on the improvement of grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in field conditions[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(1):97-110.
- [25] 顾建芹, 朱峰, 陈春栋, 等. 蚯蚓粪有机肥在水稻上的应用效果初探[J]. 上海农业科技, 2017(4):100-101, 105.
- GU Jian-qin, ZHU Feng, CHEN Chun-dong, et al. Application of vermicompost organic fertilizer on Rice[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2017(4):100-101, 105.
- [26] 李扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 等. 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊):250-255.
- LI Yang, QIAO Yu-hui, MO Xiao-hui, et al. Analysis for earthworm feces as one of potential remediation agent of heavy metal contaminated in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2010, 29(Suppl):250-255.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [28] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进BCR法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11):1881-1884.
- ZHANG Chao-yang, PENG Ping-an, SONG Jian-zhong, et al. Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11):1881-1884.
- [29] 徐震, 田丽梅, 江应松, 等. 天津市污灌区农田环境质量现状分析[J]. 天津农林科技, 1999(6):26-28.
- XU Zhen, TIAN Li-mei, JIANG Ying-song, et al. The present situation analysis of environmental quality of sewage-irrigated farmland in Tianjin[J]. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 1999(6):26-28.
- [30] Lee Y C, Kim E J, Ko D A, et al. Water-soluble organo-building blocks of aminoclay as a soil-flushing agent for heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 196:101-108.
- [31] 冉洪珍, 郭朝晖, 肖细元, 等. 改良剂连续施用对农田水稻Cd吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3):1117-1123.
- RAN Hong-zhen, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, et al. Effects of continuous application of soil amendments on cadmium availability in paddy soil and uptake by rice[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(3):1117-1123.
- [32] 张燕, 铁柏清, 刘孝利, 等. 玉米秸秆生物炭对稻田土壤砷、镉形态的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2):715-721.
- ZHANG Yan, TIE Bo-qing, LIU Xiao-li, et al. Effects of waterlogging and application of bio-carbon from corn stalks on the physico-chemical properties and the forms of arsenic and cadmium in arsenic and cadmium-contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2):715-721.
- [33] 王莹. 红壤性水稻土铁氧化物的分异特征与固碳机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- WANG Ying. Distribution of iron oxides and C sequestration in red paddy soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [34] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 红壤性水稻土 Eh 动态变化及其影响因素初探[J]. 中国土壤与肥料, 2014(5):11-15.
- ZHANG Lei, YIN Li-chu, YI Ya-nan, et al. The dynamic change of Eh of reddish paddy soil and the preliminary study of its impact factors[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(5):11-15.
- [35] Khodadoust A P, Reddy K R, Maturi K. Effect of different extraction agents on metal and organic contaminant removal from a field soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 117(1):15-24.
- [36] 陕红. 有机物对土壤镉生物有效性的影响及机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- SHAN Hong. Impact and mechanism of organic amendments on cadmium bioavailability in soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [37] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):510-515.
- LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):510-515.
- [38] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1):65-72.
- WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing. Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1):65-72.
- [39] Liu N, Jiang Z M, Li X, et al. Mitigation of rice cadmium (Cd) accumulation by joint application of organic amendments and selenium (Se) in high-Cd-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2020, 241. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125106>.
- [40] 田桃. 不同水分管理模式对镉在水稻植株体内迁移与累积的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- TIAN Tao. Effects of different managements of irrigation water on migration and accumulation of Cd in rice plants[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.

- [41] Fulda B, Voegelin A, Kretzschmar R. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22): 12775-12783.
- [42] Fan J L, Hu Z Y, Noura Z, et al. Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 409-415.
- [43] 刘红, 汪立今. 重视非金属矿物在土壤环境保护中应用[J]. 中国矿业, 2007, 16(8): 71-73, 79.
LIU Hong, WANG Li-jin. Emphasis on application of non-metallic mineral in soil environmental protection[J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(8): 71-73, 79.
- [44] 王晶, 张旭东, 李彬, 等. 腐植酸对土壤中Cd形态的影响及利用研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 185-187.
WANG Jing, ZHANG Xu-dong, LI Bin, et al. The effect of humic acid on the cadmium transformation and the mechanism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(3): 185-187.
- [45] 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 等. 连续4 a施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1880-1887.
XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, et al. Reduction of soil cadmium activity and rice cadmium content by 4-consecutive-year application of organic fertilizer[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1880-1887.
- [46] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物有机肥对红壤水稻土中重金属及微生物量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 952-957.
GUO Bi-lin, CHEN Xiao-min, JING Feng, et al. Effects of application of bio-organic fertilizer on heavy metals and microbial biomass in a red paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 952-957.
- [47] Sampanpanish P. Effect of organic fertilizer on cadmium uptake by rice grown in contaminated soil[C]. Asia-Pacific Chemical, Biological & Environmental Engineering Society (APCBEEs). Proceedings of International Conference on Environmental and Agriculture Engineering (ICEAE 2011). 2011: 107-113.
- [48] 周璟. 外源水溶性有机物在土壤中的动态及其对重金属环境行为的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
ZHOU Jing. The dynamic of exogenous dissolved organic matter and its influence on the environmental behavior of heavy metals in soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [49] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4268-4276.
YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by *Sedum alfredii* Hance[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4268-4276.
- [50] 刘高云, 柏宏成, 叶碧莹, 等. 三种有机物料组成性质及其对土壤Cd形态与水稻Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1844-1854.
LIU Gao-yun, BAI Hong-cheng, YE Bi-ying, et al. Composition and properties of three organic materials and their effects on soil Cd speciation and Cd content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1844-1854.
- [51] 付铄岚, 王昌全, 李冰, 等. 外源Cd在不同品种水稻组织中的细胞分布和化学形态特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 903-910.
FU Shuo-lan, WANG Chang-quan, LI Bing, et al. Histocyte distribution and cadmium forms in different rice cultivar seedlings with exogenous cadmium supply[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 903-910.