

不同来源生物质炭对水稻镉锌吸收积累的影响

申小刚, 张阿凤, 叶雪珠, 陈德, 张棋, 赵首萍, 肖文丹, 伍少福

引用本文:

申小刚, 张阿凤, 叶雪珠, 陈德, 张棋, 赵首萍, 肖文丹, 伍少福. 不同来源生物质炭对水稻镉锌吸收积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 65-75.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0279>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收Pb Cd As Zn影响研究

杜彩艳, 木霖, 王红华, 严婷婷, 程在全, 曾民, 段宗颜, 雷梅, 罗红梅

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1515-1522 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0579>

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

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2102-2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0263>

小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响

左静, 陈德, 郭虎, 王静波, 隋凤凤, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1133-1140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1655>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王风, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>

生物质炭、有机肥和钙镁磷肥对三七(*Panax Notoginseng*)Cd含量的影响

陈建清, 郭栋, 陈德, 李恋卿, 潘根兴

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1909-1916 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0353>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

申小刚, 张阿凤, 叶雪珠, 等. 不同来源生物质炭对水稻镉锌吸收积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 65-75.

SHEN X G, ZHANG A F, YE X Z, et al. Effects of different biochar types on Cd and Zn uptake and accumulation by rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 65-75.

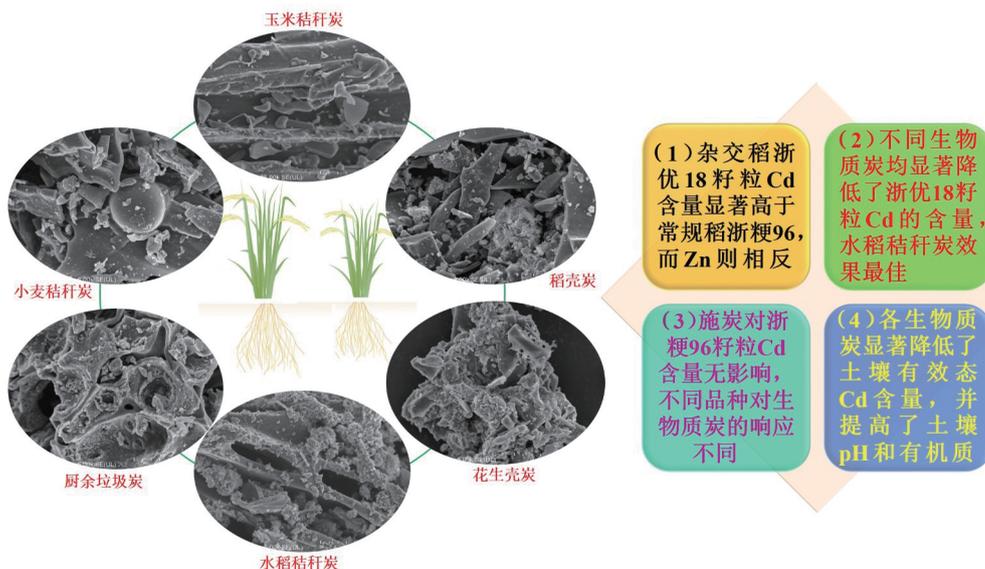


开放科学 OSID

不同来源生物质炭对水稻镉锌吸收积累的影响

申小刚^{1,2}, 张阿凤^{1*}, 叶雪珠², 陈德^{2*}, 张棋², 赵首萍², 肖文丹², 伍少福³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 浙江省农业科学院农产品质量与安全营养研究所, 农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 农业农村部农产品信息溯源重点实验室, 杭州 310021; 3. 绍兴市粮油作物技术推广中心, 浙江 绍兴 312000)



摘要: 为了筛选对土壤中镉(Cd)钝化效果好的生物质炭种类, 通过田间试验研究了玉米秸秆炭(MSBC)、水稻秸秆炭(RSBC)、稻壳炭(RHBC)、花生壳炭(PHBC)、厨余垃圾炭(CWBC)及小麦秸秆炭(WSBC)对杂交稻浙优18(ZY-18)和常规稻浙粳96(ZG-96)吸收、转运和积累Cd、Zn的影响。结果表明: ZY-18籽粒Cd含量显著高于ZG-96, 而Zn含量则相反, 前者Cd/Zn比显著高于后者。与对照相比, 不同生物质炭均降低了ZY-18籽粒中Cd的含量, 降幅在29%~56%之间, 其中RSBC处理降幅最高; MSBC和WSBC处理ZY-18籽粒中Zn含量分别降低了18%和16%; 除WSBC处理外, 各生物质炭处理均降低了ZY-18籽粒Cd/Zn比, 降幅在28%~51%之间; 各施炭处理对ZG-96籽粒Cd、Zn含量及Cd/Zn均无显著影响。水稻籽粒中Cd含量与Cd的根-茎转运系数(TF_{SR} -Cd)显著相关, Zn含量则与Zn的茎-籽粒转运系数(TF_{GS} -Zn)显著相关; ZY-18的 TF_{SR} -Cd是ZG-96的1.8~2.9倍, 而后的 TF_{GS} -Zn是前者的1.6~2.3倍; 施炭处理ZY-18的 TF_{SR} -Cd降低了33%~40%, ZG-96的 TF_{GS} -Zn则增加了38%~57%。施炭处理土壤有效态Cd和Zn分别降低

收稿日期: 2022-03-23 录用日期: 2022-06-06

作者简介: 申小刚(1996—), 男, 山西洪洞人, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属污染治理。E-mail: 1263827813@qq.com

*通信作者: 张阿凤 E-mail: zhangafeng@nwafu.edu.cn; 陈德 E-mail: chendeabcd@163.com

基金项目: 浙江省“三农六方”科技协作计划项目(2020SNLF004); 国家重点研发计划项目(2018YFF0213501)

Project supported: “Three Rural and Six Party” Science and Technology Cooperation Plan Project of Zhejiang Province(2020SNLF004); The National Key Research and Development Program of China(2018YFF0213501)

了38%~91%和53%~96%,pH值提高了0.4~1.6个单位,有机质增加了26%~65%,全氮、碱解氮、全磷及有效磷也有不同程度的增加。研究表明,不同品种水稻对Cd、Zn的吸收和转运存在差异,对生物质炭的响应也有所不同;施用生物质炭可显著提高酸性土壤的pH值、有机质及养分含量,降低土壤Cd有效性及特定水稻品种对Cd的吸收、转运和籽粒Cd/Zn比,其中RSBC效果最佳。

关键词: 水稻;品种;重金属;安全利用;原位钝化;吸收;转运

中图分类号: S511;X53;X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)01-0065-11 **doi:**10.11654/jaes.2022-0279

Effects of different biochar types on Cd and Zn uptake and accumulation by rice

SHEN Xiaogang^{1,2}, ZHANG Afeng^{1*}, YE Xuezhong², CHEN De^{2*}, ZHANG Qi², ZHAO Shouping², XIAO Wendan², WU Shaofu³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Agro-Product Safety and Nutrition, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Traceability for Agricultural Products, State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China; 3. Shaoxing Grain and Oil Crop Technology Extension Center, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to screen biochars with good stabilizing capacity to soil Cd, a field experiment was performed to evaluate the effects of addition of different types of biochar, namely maize straw biochar (MSBC), rice straw biochar (RSBC), rice husk biochar (RHBC), peanut husk biochar (PHBC), cooking waste biochar (CWBC), and wheat straw biochar (WSBC), into soil on Cd and Zn uptake, translocation and accumulation in two rice varieties, including the hybrid cultivar 'Zheyou 18' (ZY-18) and the conventional cultivar 'Zhegeng 96' (ZG-96). The Cd content of ZY-18 was significantly higher than that of ZG-96, while the Zn content showed an opposite trend. The Cd/Zn ratio of ZY-18 was significantly higher than that of ZG-96. Biochar addition significantly reduced the Cd content of rice grains (29%–56%) in ZY-18 compared with control (no biochar addition), with the greatest decrease recorded in the RSBC treatment. MSBC and WSBC addition decreased the Zn content of rice grains in ZY-18 grains by 18% and 16%, respectively. All biochar treatments, except WSBC, decreased the Cd/Zn ratio of rice grains by 28%–51% in ZY-18. There was no significant effects of biochar on Cd, Zn contents and the Cd/Zn ratio in grains of ZG-96. The Cd content of rice grains was significantly correlated with the root-to-shoot translocation factor of Cd (TF_{SR-Cd}), while the Zn content of rice grains significantly correlated with the shoot-to-grain translocation factor of Zn (TF_{GS-Zn}). The TF_{SR-Cd} of ZY-18 was 1.8–2.9 times that of ZG-96, while the TF_{GS-Zn} of the latter was 1.6–2.3 times that of the former. The TF_{SR-Cd} of ZY-18 decreased by 33%–40%, but the TF_{GS-Zn} of ZG-96 increased by 38%–57% following biochar addition. Soil available Cd and Zn decreased by respectively 38%–91% and 53%–96%, soil pH increased by 0.4–1.6 units, and soil organic matter content increased by 26%–65% following biochar addition. Moreover, the contents of soil total nitrogen, alkali hydrolysable nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus increased at varying degrees following biochar addition. Overall, the uptake and translocation of Cd and Zn differed across the cultivars, and their responses to biochar were also different. Biochar application significantly improved soil pH, organic matter content, and nutrient levels but reduced soil Cd availability, and thereby decreased the uptake and translocation of Cd and the Cd/Zn ratio of rice grains in ZY-18, with the best effects recorded under the RSBC treatment.

Keywords: rice; cultivar; heavy metal; safe utilization; *in-situ* remediation; uptake; translocation

近年来,我国面临较为严重的农田土壤镉(Cd)污染和稻米Cd超标问题^[1-2]。土壤中Cd有着相比其他重金属元素更强的生物有效性,而水稻又是Cd吸收能力最强的大宗谷类作物,长期食用Cd超标的稻米可能会对人体健康造成不同程度的危害^[3-4]。对Cd污染耕地进行治理,降低土壤中Cd的生物有效性,保障稻米安全,是当前农业生产过程中亟需解决的重要问题。原位钝化技术操作简便、成本低廉,是一种常用的安全利用措施^[1-5]。生物质炭作为一种土壤调理剂近年来已成为农业环境领域的研究热点并被广泛应用于土壤改良,它能够有效降低土壤重金属有效性及作物吸收^[6],改善土壤物理、化学性质并提高土壤

微生物活性,促进土壤固碳并降低温室气体排放,提升作物品质和产量,有较好的农业、环境效应^[7-8]。尤其是在我国当前全面推进各领域“碳达峰、碳中和”的背景下,生物质炭作为土壤改良剂具有重要的应用前景^[9]。

已有大量研究发现施用生物质炭可有效降低水稻等作物对Cd的吸收。Chen等^[10]收集了74篇已发表的文献并通过整合分析(Meta-analysis)的方法研究了施用生物质炭对植物重金属吸收的影响,发现植物体内Cd的含量平均降低了38%。此外,不同来源生物质炭对植物Cd等重金属吸收有显著影响,如施用畜禽粪便来源生物质炭植物体内Cd的降幅显著高

于秸秆、木料等来源的生物质炭,而污泥生物质炭对作物体内Cd的含量无显著影响;而且,生物质炭的pH值越高,植物体内Cd的降幅就越高^[10]。类似地,Albert等^[11]也通过整合分析的方法发现施用生物质炭后植物茎叶和根中的Cd含量分别平均降低了40.1%和27.7%,且生物质炭的粒径、pH、裂解温度均会影响植物茎和根中Cd的含量。生物质炭对土壤重金属的钝化作用主要在于其疏松多孔、具有较高的pH值和比表面积,丰富的含氧官能团和无机矿物组分,从而能够很好地吸附、络合土壤溶液中的重金属;而生物质炭的碱性等特征也使其能很好地提高土壤pH值,降低土壤中Cd的有效性及作物对Cd的吸收和转运^[10-11]。当前我国在生物质炭产业化应用方面已有很好的研究基础和政策支持,在耕地地力提升以及耕地重金属污染治理等实践中已有较多的应用。例如,农业农村部在2017年将秸秆炭化还田列为秸秆农用十大模式之一;2021年又将“秸秆炭化还田减排固碳技术”列为《2021年农业农村部重大引领性技术》之一。然而,生物质炭对土壤重金属的钝化效应受到原材料、裂解温度、施用量以及土壤条件和作物类型等诸多因素的影响。在大面积的实际应用过程中,因为用量大,只能向生物质炭生产厂家购买,因此其实际效果也受原料和厂家实际生产工艺的影响。因而,评价不同来源的工厂化生产的生物质炭对特定土壤条件下Cd的钝化效果,筛选出适宜的生物质炭产品并分析可能的原因,对于生物质炭的规模化应用具有重要意义。

大量研究表明,不同品种水稻对Cd的吸收、积累能力有很大差异^[12]。有研究者在pH为5.17,总Cd含量为 $2.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤条件下通过田间试验调查了10个品种水稻对Cd吸收和积累情况,发现不同品种水稻糙米中Cd的含量范围在 $0.21 \sim 1.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[13]。陈德等^[14]研究了20个水稻品种对Cd的吸收和积累特性,发现水稻籽粒中的Cd含量范围在 $0.07 \sim 0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,其中12个品种籽粒Cd含量 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,在合适的土壤污染条件下选用低积累水稻品种是实现水稻Cd含量达标的有效途径。然而,采取单一的低积累品种措施存在较大的不确定性,因此通常结合原位钝化措施以更好地实现水稻的安全生产。而不同来源生物质炭施用对不同品种Cd吸收的影响是否一致,还少有研究。此外,尽管水稻Cd含量是影响其安全性的重要指标,而其他元素如Zn含量的高低也会在一定程度上影响含Cd稻米的

安全性^[3,15],这是因为当饮食中Zn等营养元素不足时,人体对Cd的吸收量就会极大增加,反之亦然^[3,16]。因此,稻米中Cd的毒性和健康风险不仅取决于其自身Cd含量的多少,还与其Zn含量的多少有关。Chaney等^[3]通过研究提出稻米中Cd/Zn含量比的临界值(0.015),当稻米中Cd/Zn比高于这一临界值时,则由于Zn等元素摄入不足而导致Cd摄入量增加,进而增加潜在的健康风险。因此,研究不同生物质炭在影响不同品种水稻Cd吸收的同时,如何影响对Zn的吸收以及稻米中Cd/Zn比的变化具有重要意义。

为了有效应对土壤Cd污染和稻米Cd超标的问题,本研究在浙江省绍兴市某水稻生产基地布置田间小区试验,研究不同生物质炭施用对两个品种水稻吸收、转运及积累Cd和Zn的影响,探讨上述过程中Cd和Zn的相互作用;以期为更好地评价市售不同来源生物质炭对土壤-水稻系统Cd生物有效性的影响及可能的机制,为有效提升土壤质量和稻米安全生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤及生物质炭

田间小区试验位于浙江省绍兴市越城区某水稻基地,供试土壤为湖海相沉积物发育的水稻土,青粉泥田土属,基本性质:土壤pH值5.4,有机质(SOM)含量 $56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)含量依次为 $2.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd和Zn总量分别为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $245.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。据前期调研,当地农户种植的多个批次的稻米Cd含量均超出 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的国家限量标准值。

本研究用到的生物质炭包括玉米秸秆生物质炭(MSBC)、水稻秸秆生物质炭(RSBC)、花生壳炭(PHBC)、稻壳炭(RHBC)、厨余垃圾生物质炭(CWBC)以及小麦秸秆生物质炭(WSBC)。其中MSBC购自黑龙江大庆市金土地生物质材料制造有限公司,生产设备为转窑式连续炭化炉,炭化温度约 $400 \sim 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$;PHBC和WSBC购自商丘三利新能源有限公司,生产设备为池式炭化,炭化温度约 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$;RSBC和RHBC购自嘉兴嘉华牧业有限公司,生产设备为转窑式炭化炉,炭化温度约 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$;CWBC购自浙江金锅锅炉有限公司,生产设备为转窑式炭化炉,炭化温度约 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。各生物质炭的主要性质如表1所示,其中

表1 本研生物质炭基本性质
Table 1 Properties of biochar in this study

参数 Property	MSBC	RSBC	PHBC	RHBC	CWBC	WSBC
C/%	73.6	31.3	44.2	60.4	44.5	44.1
H/%	1.6	0.89	2.16	0.92	1.72	1.6
O/%	11.2	13.13	18.06	12.1	13.5	12.4
N/%	0.79	0.36	1.39	0.74	1.85	1.2
S/%	0.075	0.78	0.22	0.36	0.13	0.48
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.12	0.20	0.16	0.28	0.52	0.09
Zn/(mg·kg ⁻¹)	232	248	90.9	116	314	78.9
灰分 Ash/%	11.8	53.0	33.7	22.1	37.4	32.3
pH	8.3	12.3	10.8	8.9	10.4	9.9
有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	598	268	363	355	363	440
比表面积 Surface area/(m ² ·g ⁻¹)	2.18	17.0	3.36	146.8	15.0	8.96

C、H、O、N、S含量用元素分析仪测定,有机碳参考土壤有机碳的测定方法(重铬酸钾氧化法),比表面积为BET比表面积。

1.1.2 供试水稻

每个小区设置2个水稻品种,供试水稻品种为浙优18(ZY-18)和浙粳96(ZG-96),其中浙优18为籼型杂交稻、浙粳96为粳型常规稻,两个水稻品种均来自绍兴市舜达种业有限公司。水稻于2020年5月30日浸种、育秧,6月25日插秧。

1.2 试验设计

选择地势平坦、地力均匀的地块布置小区试验。设置MSBC、RSBC、RHBC、PHBC、CWBC和WSBC共6个生物质炭处理,每个处理生物质炭的用量为30 t·hm⁻²,同时设置不施生物质炭对照(CK),共7个处理,每个处理3次重复,随机区组排列,共21个小区,每个小区面积20 m²(5 m×4 m),小区四周设保护行,宽度1 m。在此基础上设置裂区试验,每个小区设置2个水稻品种。在水稻移栽前15 d平整土地、划定小区并施用生物质炭,将生物质炭均匀撒于土壤表面并人工翻匀,深度约0~20 cm。水分管理、施肥、施药等田间管理措施与农户一致。

1.3 样品采集与处理

水稻进入成熟期后测产并采集植株和土壤样品,采样时间为2020年10月20日。各小区随机采集6株水稻装入网袋并带回实验室,用不锈钢剪刀分成稻穗、茎叶和根三部分,用自来水将附着的泥土等杂质冲洗干净,随后用去离子水冲洗3次。晾干水分,在105℃的烘箱中杀青30 min,然后在70℃条件下烘干。烘干后的稻穗脱粒后用不锈钢检验砻谷机脱壳。

糙米、茎叶和根用不锈钢粉碎机粉碎后置于自封袋备用。用不锈钢土钻以“S”形采集混合土壤样品,每个小区采集6个点位,采集深度为0~20 cm。土壤样品带回实验室后去除杂质并置于玛瑙研钵研磨后依次过10、60目及100目尼龙筛,置于自封袋备用。过100目筛的土壤样品用于全量养分和重金属总量的测定,过60目筛的样品用于测定土壤有机质含量,过10目筛的样品用于测定土壤pH值、有效态养分含量以及可提取态Cd和Zn的含量。

水稻各部位样品用HNO₃-HClO₄(体积比为5:1)经微波消解后,用ICP-MS(X-series 2,赛默飞世尔,美国)测定。每个批次的样品消解时分别带3个空白样品和3个标准物质进行质控。Cd和Zn的标样回收率分别为93%~104%和92%~106%。土壤样品的分析测定参照鲁如坤《土壤农化分析》中的方法。土壤pH值用pH计测定(PHS-3C,上海雷磁),水土比2.5:1,有机质含量用重铬酸钾容量法测定,全氮含量用全自动凯氏定氮仪测定(K1100,山东海能),全磷含量用浓硫酸-高氯酸消解后比色测定,土壤碱解氮含量用碱解扩散法测定,有效磷含量采用氟化铵-盐酸浸提-磷钼蓝比色法测定。土壤Cd、Zn总量用HNO₃-HClO₄-HF(体积比5:1:1)浸泡经微波消解(Mars X,美国CEM公司),用ICP-MS(X-series 2,赛默飞世尔,美国)测定。土壤有效态Cd、Zn含量用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸提(固液比1:10)后经ICP-MS测定。

1.4 数据统计分析

用根-茎转运系数和茎-籽粒转运系数表示水稻由地下部向地上部转运Cd或Zn的能力:

$$TF_{SR} = C_{茎叶} / C_{根系} \quad (1)$$

$$TF_{G/S} = C_{\text{籽粒}} / C_{\text{茎叶}} \quad (2)$$

式中: $TF_{S/R}$ 表示水稻由根部向茎叶转运 Cd 或 Zn 的转运系数; $TF_{G/S}$ 表示水稻由茎叶向籽粒转运 Cd 或 Zn 的转运系数; $C_{\text{茎叶}}$ 、 $C_{\text{根系}}$ 和 $C_{\text{籽粒}}$ 分别表示水稻茎叶、根系和籽粒中特定重金属 (Cd 或 Zn) 的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

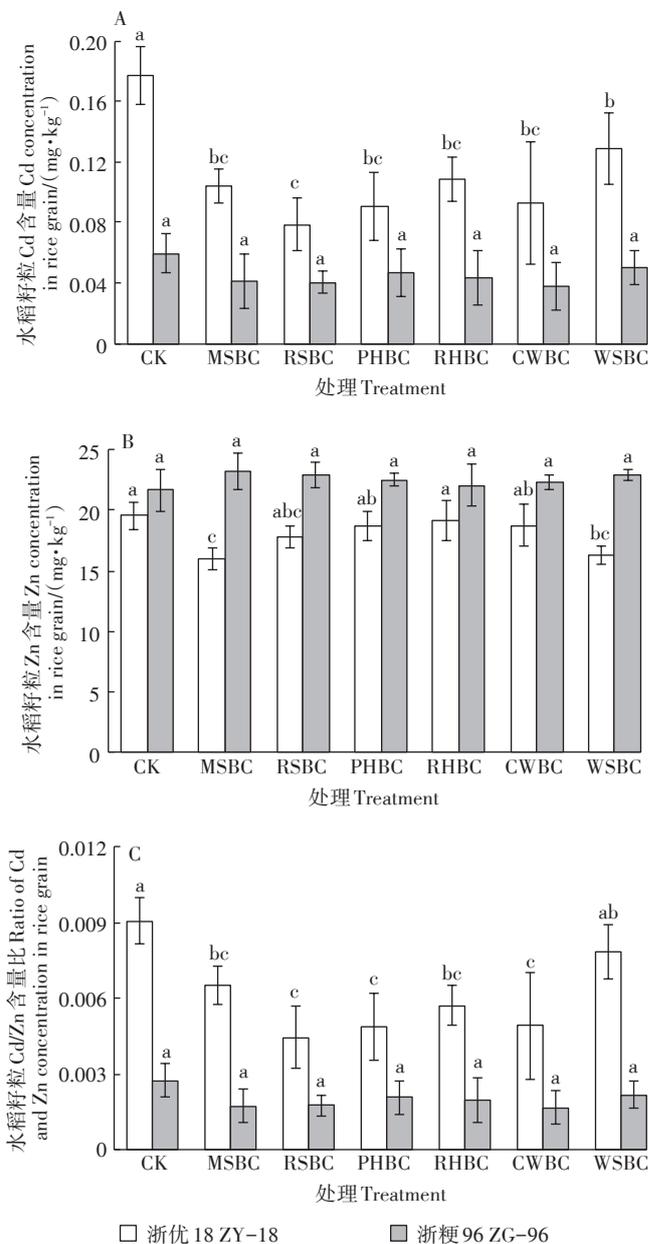
数据的整理、制图利用 Excel 2016 进行, 图表中的数据均采用平均值 \pm 标准差的形式表示。统计分析软件使用 SPSS20, 用单因素方差分析统计处理间差异, 当方差分析具有显著差异 ($P < 0.05$) 时, 利用 LSD 法对处理间平均数进行多重比较。变量间相关性用 Pearson 相关系数 (R) 表示。

2 结果与分析

2.1 水稻各部位 Cd、Zn 的含量及籽粒 Cd/Zn 比

水稻籽粒中 Cd 和 Zn 的含量及 Cd/Zn 比如图 1 所示。杂交稻品种 ZY-18 籽粒中 Cd 的含量范围在 $0.08 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间 (图 1A), Zn 的含量在 $16.0 \sim 19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1B); 常规稻品种 ZG-96 中 Cd 的含量在 $0.037 \sim 0.059 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, Zn 的含量在 $21.6 \sim 23.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。ZY-18 籽粒中 Cd 的含量明显高于 ZG-96 (图 1A), 而 Zn 则相反 (图 1B)。与对照相比, 各生物质炭处理 ZY-18 籽粒中 Cd 的含量均显著降低, 降幅在 29%~56% 之间, 其中 RSBC 处理籽粒中 Cd 的降幅最高, 其次为 PHBC 和 CWBC, WSBC 降低幅度最低; 各处理 ZG-96 籽粒中 Cd 含量与对照相比无显著变化。MSBC 和 WSBC 处理 ZY-18 籽粒中 Zn 的含量与对照相比分别降低了 18% 和 16%, 而各生物质炭处理 ZG-96 籽粒中 Zn 的含量与对照相比无显著变化。如图 1C 所示, 除 WSBC 处理外, 各生物质炭处理 ZY-18 籽粒 Cd/Zn 比均显著降低, 降幅在 28%~51% 之间, 其中 RSBC 降幅最大, PHBC 和 CWBC 次之, MSBC 最低; ZG-96 籽粒中 Cd/Zn 比无显著差异。

各处理水稻茎叶和根中 Cd、Zn 的含量如图 2 所示, 除 WSBC 外, 各生物质炭处理均显著降低了 ZY-18 茎叶中 Cd 的含量, 降幅为 38%~61% 之间, 其中 RSBC 降幅最高, PHBC、CWBC 次之; ZG-96 茎叶中 Cd 的含量无显著变化 (图 2A)。与对照相比, 生物质炭处理 ZY-18 茎叶中 Zn 的含量降低了 15%~32%, RSBC 降幅最高, RHBC 降幅最低; ZG-96 茎叶中 Zn 的含量也降低了 15%~32%, RSBC 降幅最高, WSBC 降幅最低 (图 2B)。与对照相比, ZY-18 根中 Cd 含量仅 RSBC、PHBC 和 CWBC 处理显著降低, 降幅分别为 37%、30% 和 35%; ZG-96 根中 Cd 含量仅 CWBC 处理



不同小写字母表示同一品种各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters mean significant differences between treatments of the same cultivar ($P < 0.05$). The same below

图1 水稻籽粒中 Cd、Zn 含量及 Cd/Zn 比

Figure 1 Cd and Zn concentration in rice grain and the ratio

显著降低了 44% (图 2C)。两个品种水稻根中 Zn 的含量与对照相比均无显著变化 (图 2D)。

2.2 水稻 Cd、Zn 的转运系数

图 3 为不同处理对两个品种水稻 Cd、Zn 转运系数的影响。由图 3 可知, 与对照相比, RSBC、PHBC、RHBC 三个处理显著降低了 ZY-18 体内 Cd 的根-茎转运系数 ($TF_{S/R}$ -Cd), 降幅分别为 40%、34% 和 33%; ZG-96 体内 Cd 的根-茎转运系数无显著变化 (图

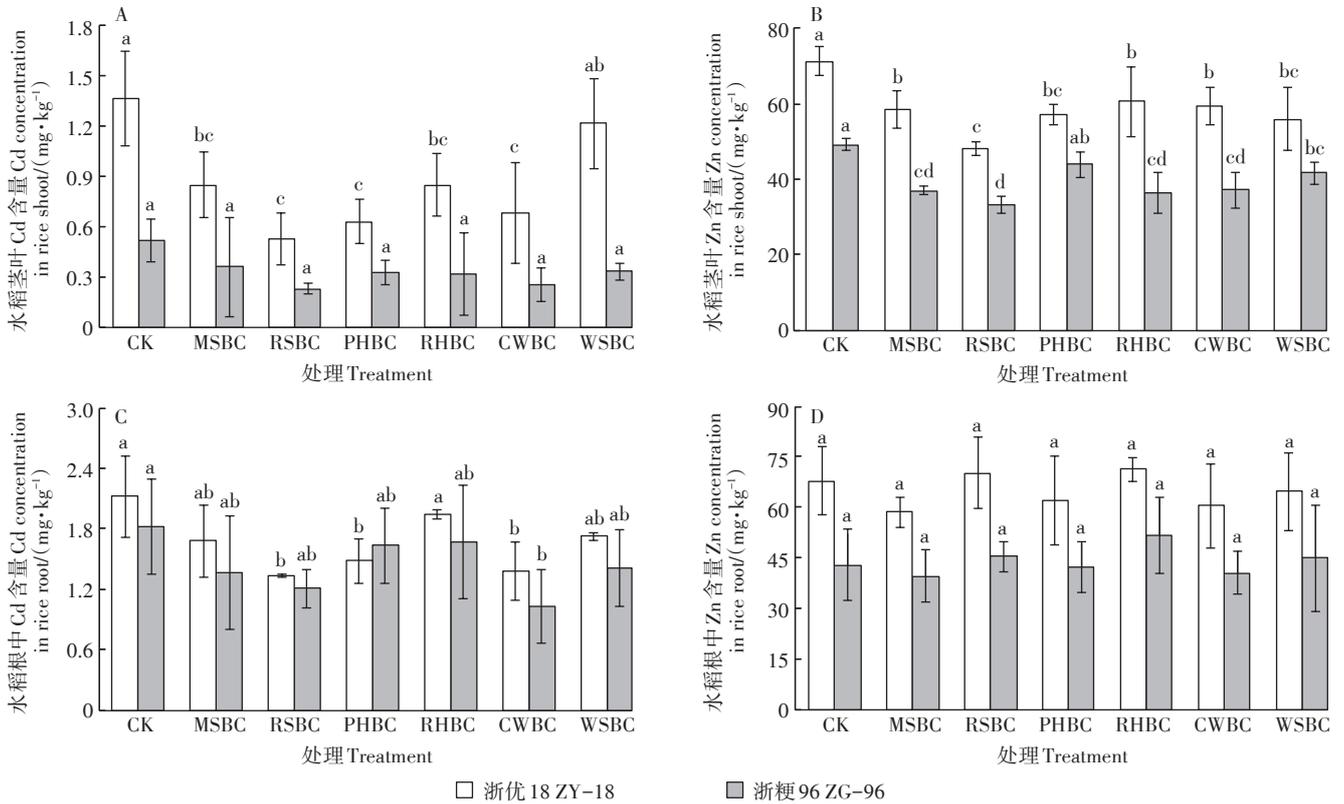


图2 水稻茎叶和根中Cd和Zn含量

Figure 2 Cd and Zn concentration in rice shoot and root

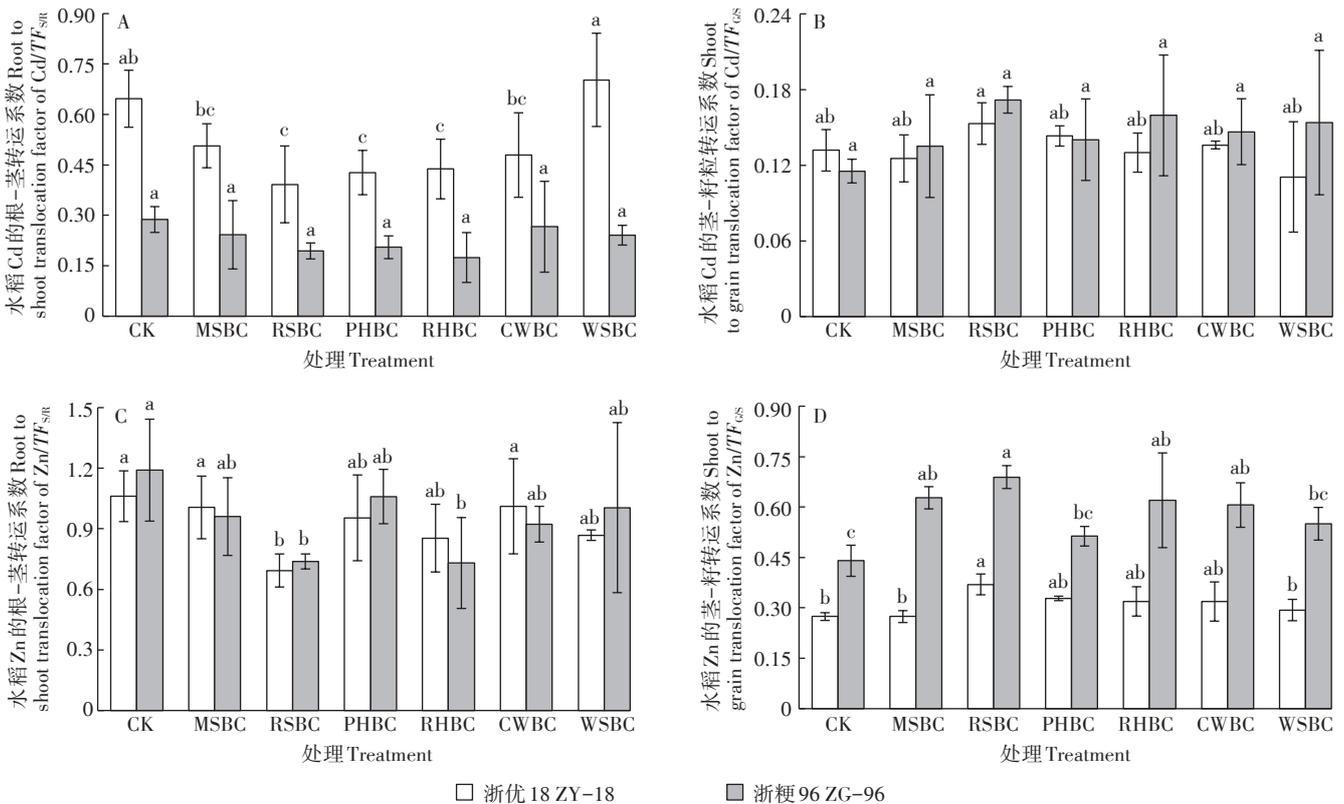


图3 水稻Cd、Zn转运系数

Figure 3 Translocation factor of Cd and Zn in rice plant

3A)。与对照相比,两个品种水稻体内Cd的茎叶-籽粒转运系数($TF_{GS}-Cd$)均无显著变化(图3B)。两个水稻品种的 $TF_{SR}-Cd$ 数值均高于其 $TF_{GS}-Cd$ 数值;ZY-18的 $TF_{SR}-Cd$ 是ZG-96的1.8~2.9倍,两个品种间的 $TF_{GS}-Cd$ 数值无显著差异。与对照相比,RSBC处理ZY-18体内Zn的根-茎转运系数($TF_{SR}-Zn$)显著降低了35%;RSBC和RHBC处理ZG-96的 $TF_{SR}-Zn$ 分别降低了38%和39%(图3C)。与对照相比,RSBC处理ZY-18体内Zn的茎叶-籽粒转运系数($TF_{GS}-Zn$)显著增加了37%;MSBC、RSBC、RHBC和CWBC处理ZG-96的 $TF_{GS}-Zn$ 增加了38%~57%,RSBC增幅最大(图3D)。各品种的 $TF_{SR}-Zn$ 数值均明显高于其对应的 $TF_{GS}-Zn$ 数值;两个品种的 $TF_{SR}-Zn$ 数值无显著差别,但ZG-96的 $TF_{GS}-Zn$ 数值明显高于ZY-18,前者是后者的1.6~2.3倍。

2.3 土壤有效态Cd、Zn含量

不同种类生物质炭添加对土壤有效态Cd、Zn含量的影响见图4。各生物质炭处理土壤有效态Cd、Zn

含量与对照相比均显著降低,其中有效态Cd的降幅在38%~91%之间(图4A),有效态Zn的降幅在53%~96%之间(图4B)。土壤中有有效态Cd、Zn的降低趋势总体一致,RSBC处理降幅最高,其次为PHBC,MSBC处理土壤有效态Cd、Zn含量降幅最低。

2.4 土壤pH、有机质及养分含量

不同种类生物质炭的施入对土壤pH值、有机质及养分含量有着不同程度的影响(表2)。施用不同生物质炭后土壤pH值与对照相比提高了0.4~1.6个单位,其中RSBC处理土壤pH值上升幅度最高,其次为PHBC处理。施用生物质炭均显著提高了土壤有机质含量,增幅在26%~65%之间,其中MSBC处理增幅最高。MSBC和CWBC处理显著增加了土壤全氮含量,增幅分别为12%和9%,而RHBC和WSBC则显著增加了土壤碱解氮含量,增幅均为7%。与对照相比,RSBC处理土壤全磷含量增加了64%,其他生物质炭处理无显著变化;而土壤有效磷含量变化更加明显,RSBC、PHBC及CWBC处理有效磷含量与对照相

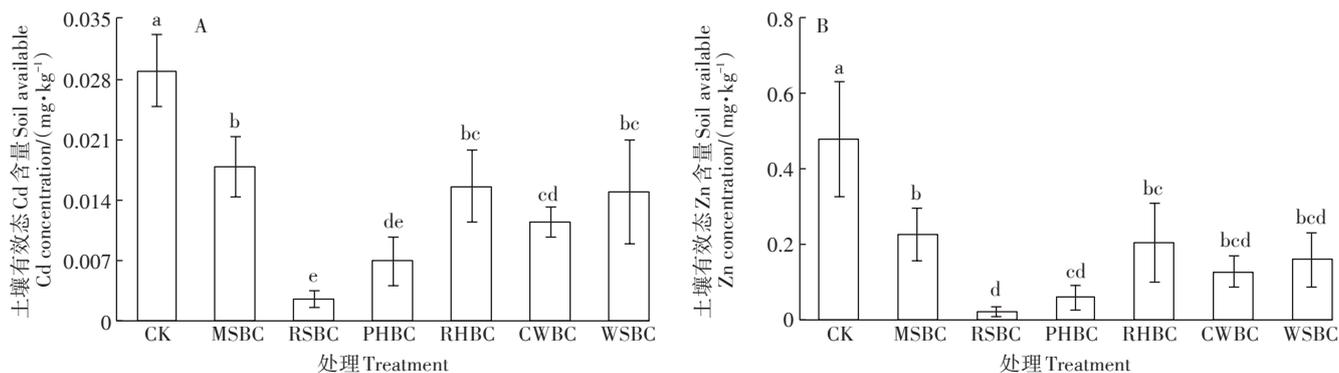


图4 不同生物质炭处理土壤有效态Cd、Zn含量

Figure 4 Available Cd and Zn concentration in soils

表2 不同处理土壤pH值、有机质及养分含量

Table 2 Soil pH, organic matter and nutrient content

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)
CK	5.45±0.15d	58.6±4.8c	2.88±0.20c	283.7±20.2a	0.72±0.04b	4.5±0.9c
MSBC	5.89±0.18c	97.0±9.9a	3.21±0.22a	270.1±5.8ab	0.85±0.08b	6.7±2.7bc
RSBC	7.04±0.23a	74.0±4.4b	2.87±0.06c	277.1±8.4ab	1.18±0.11a	15.9±2.5a
PHBC	6.63±0.30b	74.3±10.6b	2.94±0.04bc	275.7±2.5ab	0.78±0.12b	9.9±4.1b
RHBC	5.98±0.27c	74.0±3.0b	2.78±0.12c	264.4±3.7b	0.75±0.12b	6.1±0.8bc
CWBC	6.12±0.13c	74.1±4.4b	3.13±0.06b	275.9±9.6ab	0.90±0.14b	10.1±2.3b
WSBC	5.93±0.25c	78.4±12.2b	3.02±0.08b	263.4±7.1b	0.73±0.06b	7.3±2.1bc

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences between treatments at $P<0.05$.

比分别增加了253%、120%及124%。

3 讨论

3.1 不同水稻品种对Cd、Zn吸收的差异及籽粒Cd/Zn比

本研究结果表明,两个不同基因型供试水稻对Cd和Zn的吸收、转运和积累能力具有显著差异,杂交稻品种ZY-18籽粒Cd含量显著高于常规稻品种ZG-96,而前者Zn含量却低于后者。这一方面可能是由于杂交稻品种具有更强的Cd吸收、转运能力,这主要体现在前者茎叶中Cd和根-茎转运系数明显高于后者。相关分析结果表明水稻籽粒中Cd的浓度与Cd的根茎-转运系数有显著正相关关系(表3)。陈德等^[14]在pH值5.5、Cd含量 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤条件下研究了不同品种对Cd、Zn积累转运的影响,发现ZY-18、甬优9和甬优12等Cd含量相对最高的品种均为杂交稻,而秀水519、秀水03、嘉58等Cd含量最低的品种均为常规稻,这与前人的研究结果类似^[4,17]。另一方面可能是由于ZG-96具有更强的Zn吸收转运能力,主要体现在其籽粒中有着更高的Zn含量和更低的Cd/Zn比,以及较高的茎-籽粒Zn转运系数。相关分析结果也表明籽粒Cd、Zn含量具有显著的负相关关系(表3),说明Cd、Zn之间的拮抗作用也可能是ZG-96籽粒中Cd含量低的重要原因。陈德等^[14]的研究发现秀水519和甬优362等品种的籽粒Cd、Zn含量表现出Cd低Zn高,而ZY-18和甬优12等品种表现出Cd高Zn低,但是20个品种之间籽粒Cd和Zn的含量无显著的相关关系,即不具有普遍性。此外,通过外源添加Zn从而抑制Cd在籽粒中的积累,也说明Cd、Zn之间的拮抗作用^[18-19]。

3.2 不同生物质炭影响水稻Cd、Zn吸收、转运的可能机制

本研究的结果表明,生物质炭的施用均有效降低了土壤-水稻系统Cd的生物有效性,且不同生物质炭之间存在较大差异,如ZY-18籽粒中Cd的降幅为29%~56%,而土壤有效态Cd的降幅为38%~91%,其中RSBC效果最佳。造成不同生物质炭效果差异的首要因素可能在于其pH值不同。研究表明,较高的pH值引起的“石灰效应”是生物质炭钝化土壤中Cd等重金属的主要作用机理^[20],相关性分析也显示水稻籽粒中Cd的浓度与土壤有效态Cd含量显著相关,而有效态Cd含量与土壤pH值显著负相关(表3)。生物质炭的施入大幅提高了酸性土壤的pH值,从而引起土壤负电荷数量增加,这有利于土壤颗粒吸附、络合

土壤溶液中Cd等重金属,在特定条件下甚至会促进沉淀的形成^[21-22]。Chen等^[10]的研究也发现,生物质炭的pH值越高,其对植物中Cd等重金属的降低幅度越大,而当pH值大于10时效果最佳。本研究中,水稻秸秆炭RSBC的pH值最高,PHBC和CWBC次之,三种生物质炭处理对应的土壤pH值、有效Cd以及籽粒中Cd含量的变化幅度与其自身pH值大小一致。王霞等^[23]在pH值5.77、Cd含量 $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的田间条件下研究了同一工厂生产的水稻秸秆炭、小麦秸秆炭和玉米秸秆炭对水稻Cd吸收的影响,发现当三种炭的用量为 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个用量时,水稻籽粒中Cd含量均无显著变化;当施用量为 $16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,仅水稻秸秆炭处理水稻糙米中Cd含量显著降低,而三种生物质炭中水稻秸秆炭的pH值最高(8.88)。该研究与本研究较一致的是,不同生物质炭之间均为水稻秸秆炭效果最佳,而不同的是生物质炭对Cd的钝化效果较差,原因可能在于所用的生物质炭pH值较低、施用量较少以及土壤Cd含量较高,同时也说明不同厂家生产的生物质炭性质(如pH值)有较大差异,这可能与其生产条件和工艺有关。RSBC的pH值比较高的原因除了水稻秸秆自身的特性外,还可能与其炭化温度较高有关,较高的炭化温度不仅可以提高生物质炭的pH值,也增加了水稻生物质炭的灰分含量(表1)。而灰分中含有的碳酸盐、磷酸盐等无机矿物组分则有利于促进生物质炭对土壤溶液中Cd等重金属的吸附、固定^[24-25]。李瑞月等^[26]研究了统一条件下($450 \text{ }^\circ\text{C}$ 裂解)制备的小麦、水稻、玉米秸秆炭对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的去除效果,发现前两种炭对重金属的去除效果均高于玉米秸秆炭,并推测其主要原因是由于前两种炭具有较高的碳酸盐、磷酸盐等无机矿物组分;另外,Chen等^[27]也研究了水洗和未水洗生物质炭对溶液中 Pb^{2+} 的去除效果,发现水洗后生物质炭中可溶性磷酸盐、碳酸盐、硅酸盐等无机矿物大幅降低,因而其对 Pb^{2+} 的去除效率也大幅降低,而未水洗炭因为具有较高的磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐等无机矿物组分,因而对 Pb^{2+} 的去除率较高,且吸附平衡后溶液中上述可溶性无机矿物离子大幅降低,说明这些离子参与了去除溶液中 Pb^{2+} 的反应。尽管生物质炭的比表面积和孔隙结构可能会对其吸附、固定重金属有一定贡献,然而,已有的较多研究发现,比表面积大的炭质材料对Cd、Pb等重金属的吸附固定能力反而可能会较低^[24-25],表明比表面积对生物质炭钝化重金属的贡献可能较小,Zheng等^[28]的研究也表明,虽然稻壳炭的比

表面积是水稻秸秆炭的5.6倍,然而后者的pH值却高于前者1.3个单位,因而水稻秸秆炭更有利于降低作物(小麦)对Cd的吸收。此外,除不同生物质炭之间的差异外,生物质炭的粒径也会影响到其对土壤重金属的钝化效果和植物吸收,通常来讲,粒径越小,效果越好^[29-30]。

生物质炭的施用降低了ZY-18体内Cd的根-茎转运系数,这可能也是其降低水稻籽粒中Cd含量的重要因素。Cd由根向茎叶的转运能力以及由茎叶向籽粒的转运能力是最终影响水稻籽粒中Cd含量的重要因素,研究表明,转运系数越高,水稻由根部向茎叶及籽粒转运Cd等的能力就越强^[31-32]。相关分析也表明,籽粒Cd含量与Cd的根-茎转运系数显著相关,且Cd的茎-籽粒转运系数明显小于根-茎转运系数,也说明根-茎转运能力是决定水稻籽粒中Cd最终浓度的重要因素。Chen等^[33]的研究也发现,施用生物质炭降低了水稻对Cd的根-茎转运系数,这可能是由于生物质炭的添加提高了土壤有效硅含量并增加了水稻茎叶中硅的含量,而硅含量的增加可以和水稻体内的

Cd发生反应从而阻抑Cd向地上部运输^[34-35]。

尽管添加生物质炭后土壤中有效态Zn的降幅大于土壤有效态Cd的降幅,但籽粒Zn含量对此所受的影响较小。这一方面可能是由于土壤中有效态Zn的含量比有效态Cd含量高,尽管生物质炭处理较大幅度地降低了有效Zn的含量,但土壤溶液中仍有较充足的Zn供水稻吸收;其次,可能是由于水稻根系对缺Zn的响应机制,有研究表明在土壤有效Zn较低的情况下,水稻根系中的某些基因可以表达,以提高Zn的吸收和转运^[36-37]。此外,不同水稻品种对Zn的吸收积累的确存在差异,尤其是在缺Zn的条件下,高Zn水稻品种具有更高的吸收和转运Zn的能力^[38]。与Cd相比,生物质炭添加对水稻吸收Zn的影响较小,因而生物质炭处理在降低ZY-18籽粒中Cd含量的同时,更有利于降低水稻籽粒的Cd/Zn比。而低积累品种ZG-96有着更低的籽粒Cd含量、更高的Zn含量和更小的Cd/Zn比,具有更高的安全性。可见生物质炭添加和低积累水稻品种的选种都是实现受污染耕地安全利用的有效途径。本研究的结果显示,施用生物质

表3 水稻各部位Cd、Zn含量,转运系数与土壤有效态含量及基本性质之间的相关性(相关系数R)

Table 3 Correlation between Cd and Zn content in various parts of rice, translocation factor, soil available Cd, Zn concentration and basic properties (correlation coefficient R)

	籽粒Cd Grain Cd	籽粒Zn Grain Zn	Cd/Zn	茎叶Cd Shoot Cd	根中Cd Root Cd	$TF_{Sn}-Cd$	$TF_{Cs}-Cd$	茎叶Zn Shoot Zn	根中Zn Root Zn	$TF_{Sn}-Zn$	$TF_{Cs}-Zn$	有效Cd Available Cd	有效Zn Available Zn	土壤pH Soil pH	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	有效磷 AP	
籽粒Cd Grain Cd	1																		
籽粒Zn Grain Zn	-0.59**	1																	
Cd/Zn	0.84**	-0.73**	1																
茎叶Cd Shoot Cd	0.94**	-0.56**	0.79**	1															
根中Cd Root Cd	0.60**	-0.16	0.45**	0.68**	1														
$TF_{Sn}-Cd$	0.89**	-0.67**	0.78**	0.92**	0.38*	1													
$TF_{Cs}-Cd$	-0.30	0.18	-0.24	-0.53**	-0.53**	-0.46**	1												
茎叶Zn Shoot Zn	0.86**	-0.63**	0.73**	0.80**	0.49**	0.78**	-0.34*	1											
根中Zn Root Zn	0.73**	-0.65**	0.74**	0.64**	0.36*	0.65**	-0.11	0.62**	1										
$TF_{Sn}-Zn$	0.05	0.075	-0.091	0.097	0.12	0.067	-0.28	0.33*	-0.51**	1									
$TF_{Cs}-Zn$	-0.78**	0.84**	-0.75**	-0.74**	-0.40*	-0.79**	0.35*	-0.92**	-0.66**	-0.24	1								
有效Cd Available Cd	0.37*	-0.07	0.22	0.42**	0.40*	0.30	-0.32*	0.34*	0.004	0.37*	-0.26	1							
有效Zn Available Zn	0.38*	-0.08	0.20	0.40*	0.36*	0.31	-0.28	0.32*	0.085	0.25	-0.25	0.96**	1						
土壤pH Soil pH	-0.34*	0.049	-0.22	-0.40**	-0.39*	-0.30	0.36*	-0.32*	0.026	-0.36*	0.24	-0.94**	-0.85**	1					
有机质 SOM	-0.16	-0.050	0.011	-0.10	-0.09	-0.066	-0.11	-0.17	-0.10	-0.075	0.11	-0.30	-0.38*	0.22	1				
全氮 TN	-0.04	0.036	-0.025	0.038	-0.06	0.087	-0.24	0.006	-0.31	0.35*	0.034	-0.12	-0.26	-0.037	0.64**	1			
全磷 TP	-0.17	0.041	-0.18	-0.21	-0.29	-0.10	0.19	-0.31	0.10	-0.43**	0.23	-0.63**	-0.49**	0.71**	0.30	0.10	1		
有效磷 AP	-0.24	0.10	-0.25	-0.28	-0.36*	-0.13	0.17	-0.27	0.054	-0.35*	0.21	-0.82**	-0.69**	0.84**	0.12	0.045	0.86**	1	

注:**和*分别表示在0.01和0.05水平(双侧)上显著相关。

Note:** and * indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 levels (bilaterals), respectively.

炭对ZG-96籽粒中Cd的含量无显著影响,这可能是由于其对Cd的吸收能力本来就较低,也说明不同品种对Cd的吸收积累受生物质炭的影响不同。此外,尽管本研究中未施用生物质炭对照两个品种籽粒中Cd的含量均未超标,但生物质炭的添加会极大地降低降雨量减少等气候波动造成水稻籽粒中Cd积累上升的风险,同时也会降低农户选用其他Cd积累能力更高的品种的Cd超标风险。最后,生物质炭当前的成本仍较高,在大面积应用时可考虑与石灰、海泡石等碱性材料混合施用,从而减少用量、降低成本,这些问题均有待进一步研究。

4 结论

(1)杂交稻品种浙优18对Cd的吸收、转运和积累显著高于常规稻品种浙粳96,而Zn则呈现出相反的规律,浙优18籽粒的Cd/Zn比显著高于浙粳96的。

(2)施用生物质炭处理可显著降低浙优18各部位Cd的含量,降幅在29%~56%之间,不同种类生物质炭之间存在差异,其中水稻秸秆炭处理降幅最高;生物质炭对籽粒中Zn含量的影响较小;生物质炭处理可有效降低浙优18中Cd的根-茎转运系数和籽粒Cd/Zn比;施炭对低积累品种浙粳96籽粒Cd含量无显著影响,不同水稻品种对生物质炭处理的响应不同。

(3)生物质炭处理可显著降低土壤有效态Cd、Zn含量,降幅分别为38%~91%和53%~96%。施用不同种类生物质炭土壤pH值提高了0.4~1.6个单位,有机质含量增加了26%~65%,且土壤氮磷养分含量也有不同程度的增加。

参考文献:

- ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 49(2): 750-759.
- XU C B, YANG W J, ZHU L S, et al. Remediation of polluted soil in China: Policy and technology bottlenecks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(24): 14027-14029.
- 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]. *Biometals*, 2004, 17(5): 549-553.
- 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中Cd吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 43-48. GONG W Q, PAN G X. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(5): 43-48.
- GUO G L, ZHOU Q X, MA L Q. Availability and assessment of fixing additives for the *in situ* remediation of heavy metal contaminated soils: A review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 116(1/2/3): 513-528.
- 刘振刚, 夏宇, 孟芋含, 等. 生物质炭材料修复重金属污染土壤的研究进展: 修复机理及研究热点分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1140-1148. LIU Z G, XIA Y, MENG Y H, et al. Research advances in biomass-based carbon materials for remediation of heavy metal contaminated soil: Immobilization mechanism and analysis of related studies[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1140-1148.
- 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463. ZHANG A F, PAN G X, LI L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459-2463.
- HE M, XIONG X, WANG L, et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125378.
- WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. *The Innovation*, 2021, 2(4): 100180.
- CHEN D, LIU X Y, BIAN R J, et al. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals: A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 76-85.
- ALBERT H A, LI X, JEYAKUMAR P, et al. Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142582.
- PINSON S R M, TARPLEY L, YAN W G, et al. Worldwide genetic diversity for mineral element concentrations in rice grain[J]. *Crop Science*, 2015, 55(1): 294-311.
- 唐非, 雷鸣, 唐贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1092-1098. TANG F, LEI M, TANG Z, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1092-1098.
- 陈德, 叶雪珠, 张棋, 等. 不同水稻品种对Cd、Zn的积累特性[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(10): 2113-2118, 2121. CHEN D, YE X Z, ZHANG Q, et al. Accumulation characteristics of Cd and Zn in different rice varieties[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(10): 2113-2118, 2121.
- 张良运, 李恋卿, 潘根兴. 南方典型产地大米Cd、Zn、Se含量变异及其健康风险探讨[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2792-2797. ZHANG L Y, LI L Q, PAN G X. Study on the variation of Cd, Zn, Se content and health risk of rice from typical producing areas in South China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2792-2797.
- REEVES P G, CHANEY R L. Marginal nutritional status of zinc, iron, and calcium increases cadmium retention in the duodenum and other organs of rats fed rice-based diets[J]. *Environmental Research*, 2004, 96(3): 311-322.
- YAN J L, WANG P T, WANG P, et al. A loss-of-function allele of

- OsHMA3 associated with high cadmium accumulation in shoots and grain of Japonica rice cultivars[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, 39(9):1941–1954.
- [18] 靳磊, 胡召华, 纪雄辉, 等. 不同时期喷施 Zn 肥抑制水稻 Cd 吸收转运的效果[J]. *湖南农业科学*, 2017(8):37–40, 44. JIN L, HU Z H, JI X H, et al. Effects of zinc foliar application at different growth stages on cadmium absorption and transport in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(8):37–40, 44.
- [19] 李虹呈, 王倩倩, 贾润语, 等. 外源锌对水稻各部位镉吸收与累积的拮抗效应[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12):4854–4863. LI H C, WANG Q Q, JIA R Y, et al. Antagonistic effects of exogenous zinc on uptake and accumulation of cadmium in various rice organs[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12):4854–4863.
- [20] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):779–785. YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779–785.
- [21] LINDSAY W L. Chemical equilibria in soils[M]. John Wiley and Sons Ltd., 1979.
- [22] MCBRIDE M, SAUVE S, HENDERSHOT W. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(2):337–346.
- [23] 王霞, 仓龙, 杨杰, 等. 不同生物质炭和矿物钝化材料对镉污染稻田土壤的修复研究[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(4):80–86. WANG X, CANG L, YANG J, et al. Remediation of Cd contaminated paddy soil using different kinds of biochar and mineral materials: A field trial[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(4):80–86.
- [24] CAO X D, MA L N, GAO B, et al. Dairy–manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(9):3285–3291.
- [25] TAN X F, LIU Y G, ZENG G M, et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions[J]. *Chemosphere*, 2015, 125:70–85.
- [26] 李瑞月, 陈德, 李恋卿, 等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5):1001–1008. LI R Y, CHEN D, LI L Q, et al. Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} in aqueous solution by biochars derived from different crop residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):1001–1008.
- [27] CHEN D, LI R Y, BIAN R J, et al. Contribution of soluble minerals in biochar to Pb^{2+} adsorption in aqueous solutions[J]. *Bioresources*, 2017, 12(1):1662–1679.
- [28] ZHENG R L, CHEN Z, CAI C, et al. Effect of biochar from rice husk, bran, and straw on heavy metal uptake by pot-grown wheat seedling in a historically contaminated soil[J]. *Bioresources*, 2013, 8(4):5965–5982.
- [29] 黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 等. 生物炭对土壤–植物体系中铅镉迁移累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):2205–2216. HUANG L X, WEI L, LIU X W, et al. Effects of biochar on the migration and accumulation of lead and cadmium in soil–plant systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2205–2216.
- [30] LU K P, YANG X, SHEN J J, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola*[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191:124–132.
- [31] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60:2677–2688.
- [32] YU Z G, ZHOU Q X. Growth responses and cadmium accumulation of *Mirabilis jalapa* L. under interaction between cadmium and phosphorus[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167:38–43.
- [33] CHEN D, GUO H, LI R Y, et al. Low uptake affinity cultivars with biochar to tackle Cd-tainted rice: A field study over four rice seasons in Hunan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541:1489–1498.
- [34] GU H H, QIU H, TIAN T, et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9):1234–1240.
- [35] SEYFFERTH A L, AMARAL D, LIMMER M A, et al. Combined impacts of Si-rich rice residues and flooding extent on grain As and Cd in rice[J]. *Environment International*, 2019, 128:301–309.
- [36] RAMESH S A, SHIN R, EIDE D J, et al. Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133:126–134.
- [37] ISHIMARU Y, SUZUKI M, KOBAYASHI T, et al. OsZIP4, a novel zinc-regulated zinc transporter in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56:3207–3214.
- [38] MENG F, LIU D, YANG X, et al. Zinc uptake kinetics in the low and high-affinity systems of two contrasting rice genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177:412–420.

(责任编辑:叶飞)