

生物炭对复合污染土壤—作物中镉砷累积和转运的影响

周 昶¹, 霍 捷², 李鼎豪¹, 薛培英¹, 陈苗苗¹, 刘文菊¹

(1.省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室,河北省农田生态环境重点实验室,
河北农业大学资源与环境科学学院,河北 保定 071000;2.保定市农业科学院,河北 保定 071000)

摘要: 针对镉砷复合污染土壤中小麦籽粒重金属积累问题,采用生物模拟方法,以镉砷复合污染区土壤为研究对象,探究杏核生物炭(C1 和 C2 分别表示 3%和 6%生物炭添加量)对复合污染土壤—小麦/玉米系统中镉砷累积和转运的影响。结果表明:添加生物炭(C1、C2)显著降低了小麦季根际/非根际土壤 Cd、As 有效性,并且小麦籽粒中 Cd、As 含量分别比 CK 平均降低 19.25%和 50.70%,但前者差异不显著。对玉米而言,生物炭 C1、C2 处理显著降低穗中 Cd 和 As 含量,降幅分别为 85.67%,61.28%和 98.36%,96.48%;此外,施用生物炭显著降低了小麦—玉米体系中镉砷的转运和累积,但对小麦镉由秸秆向籽粒转运及籽粒中镉累积的影响未达显著水平。总之,添加 3%生物炭可降低小麦籽粒和玉米穗中镉、砷含量,且对玉米穗中重金属镉、砷降低效果更明显,综合分析生物炭对镉、砷在复合污染石灰性土壤—小麦/玉米体系中迁移和累积的阻控效应,推荐施用 3%生物炭为宜。

关键词: 生物炭; 土壤—小麦/玉米体系; 土壤镉砷有效性; 籽粒镉砷富集

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0393-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.048

Effects of Biochar Application on Accumulation and Transport of Cadmium and Arsenic in System of Contaminated Soil-Crops

ZHOU Chang¹, HUO Jie², LI Dinghao¹, XUE Peiying¹, CHEN Miaomiao¹, LIU Wenju¹

(1.State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Provincial and Ministerial Co Construction, Key Laboratory of Ecological of Farmland in Hebei Province, College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000; 2.Baoding Academy of Agricultural Sciences, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: It is a big problem that the accumulation of heavy metals in wheat grains from in farmland soil contaminated with cadmium (Cd) and arsenic (As). Using biological simulation method, taking the soil in Cd and As compound polluted area as the research object, the experiment was conducted to explore the effects of biochar addition (C1 and C2 represented 3% and 6% biochar added in contaminated soil) on the accumulation and transport of Cd and As in the system contaminated soil-wheat/maize. The results showed that the addition of biochar significantly reduced the availability of Cd and As in the rhizosphere soil or non-rhizosphere soil in wheat season. And the average contents of Cd and As in wheat grains decreased by 19.25% and 50.70% compared with CK, but the difference was not significant for Cd. For the maize, the biochar treatments of C1 and C2 significantly reduced the contents of Cd and As in the ears, with a decrease of 85.67%, 61.28% and 98.36% and 96.48%, respectively. Furthermore, the biochar addition decreased the translocation and accumulation of Cd and As in the system of wheat-maize, but the treatments had no significant effect on the transport of Cd from straw to grain and Cd accumulation in wheat grains. In conclusion, adding 3% biochar in contaminated soil alleviated the contents of Cd and As in wheat grains and maize ears, and had a more obvious effect on the reduction of heavy metals Cd and As in maize ears. It was better pathway to reduce the translocation and accumulation of Cd and As in the system of contaminated soil and wheat/maize through addition of 3% biochar in soil.

收稿日期:2022-03-09
资助项目:河北省重点研发计划项目(20324002D);国家自然科学基金联合基金项目(U21A2024)
第一作者:周昶(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤污染防治与修复研究。E-mail:854520873@qq.com
通信作者:刘文菊(1971—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤污染防治与修复研究。E-mail:liuwj@hebau.edu.cn
陈苗苗(1982—),女,硕士,讲师,主要从事土壤环境化学研究。E-mail:chenmm@hebau.edu.cn

Keywords: biochar; soil-wheat/maize system; availability of Cd and As in soil; accumulation of Cd and As in grains

我国华北平原地区水资源短缺,长期以来农田污灌现象普遍,而造成土壤重金属污染问题凸显,其中镉(Cd)、砷(As)污染问题尤为突出^[1]。华北地区是小麦和玉米的主产区,农田土壤镉砷污染不仅影响农产品品质^[2],且在作物可食部位累积,最终通过食物链危害人体健康。镉砷从土壤进入餐桌的关键地一步是土壤中 2 种重金属有效性,土壤 pH 和 Eh 对镉砷有效性有着截然不同的影响^[3],通过土壤水分和土壤酸碱度等调控措施无法协同修复土壤镉砷污染,因此,增加了镉砷复合污染的修复难度^[4]。

生物炭是生物质高温厌氧热解而成的一类多孔物质,具有比表面积大、孔隙结构和表面官能团丰富等特性,不仅能够改善土壤质量^[5-6],还可高效修复土壤重金属污染,是一种环境友好的修复材料^[7-10]。已有研究^[11]表明,生物炭因其具有高度多孔结构、比表面积大等特点,对镉等重金属阳离子吸附性较好。同时其表面具有丰富的含氧官能团,能够通过金属—配体的络合作用降低重金属离子有效性^[12]。此外,施用生物炭可显著提高土壤 pH^[13],增加土壤胶体的负电荷,与镉等金属阳离子形成氢氧化物、碳酸盐或磷酸盐沉淀来钝化土壤中重金属阳离子的活性,最终降低镉在作物可食部位累积^[14]。对于砷而言,生物炭可以增加土壤溶液中 OH⁻,OH⁻与砷酸根离子竞争吸附点位,导致吸附在土壤胶体表面的 As 发生解吸,进而增加土壤 As 有效性^[15-16]。但另一方面,生物炭能凭借自身孔隙丰富的结构,通过物理吸附降低土壤中砷的活性,有研究^[17]表明,生物炭的添加使土壤中有效态砷含量减少 16.9%~33.6%,而固定态砷比例增加 8.3%~31.0%。同时也有研究^[18]表明,吸附了镉的土壤正电荷增多,可以通过静电吸附作用在土壤表面形成镉—砷复合物,从而降低砷的有效性。由此可见,生物炭是修复镉砷复合污染土壤的理想修复材料,但是当前研究大多关注于稻田—水稻体系中镉砷修复方面^[19-21],对于小麦—玉米主产区镉砷复合污染的农田土壤而言,施用生物炭对小麦—玉米轮作镉砷污染土壤修复研究较少^[22-23],对镉砷在小麦和玉米作物体系的迁移和累积效应尚不清楚。

因此,本研究以镉砷复合污染农田石灰性土壤为研究对象,以活性炭工业副产品杏核壳生物炭为修复材料,探究生物炭的不同添加量对土壤镉砷有效性及其在小麦和玉米中迁移和累积的影响效应。旨在实现农林业废弃物资源化利用的同时降低镉砷在小麦

和玉米可食部位的累积,为华北平原小麦玉米安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:采自华北平原区某一因污灌造成的镉砷复合污染农田(115°44′10″E, 38°47′53″N)0—20 cm 耕层土壤,目前该区域依然正常开展小麦—玉米一年两熟的种植制度。土壤理化性质:pH 为 8.60,有机质含量为 17.82 g/kg,有效磷含量为 42.06 mg/kg,速效钾含量为 344.02 mg/kg,总镉含量为 3.78 mg/kg,总砷含量为 142 mg/kg。

供试生物炭材料:由河北承德华净活性炭有限公司提供,为杏核壳生物炭。生物炭基本性质:pH 为 10.42,有机碳含量为 73.13%,EC 为 907 μS/cm,CEC 为 42.63 cmol/kg,有效磷含量为 347.84 mg/kg,速效钾含量为 6.97 g/kg,镉含量为 0.71 mg/kg,砷含量为 1.53 mg/kg,比表面积为 27.19 m²/g,电镜扫描观测生物炭孔径为 4~10 μm。

供试品种:小麦品种为“济麦 22”,玉米品种为“先玉 335”,均为已有研究^[24-25]筛选出的可食部分籽实镉低积累品种。

1.2 试验设计

2020 年 1—9 月在日光温室自然光照条件下开展盆栽试验。共设 2 个不同生物炭添加量处理,分别为 C1 处理(按照质量比添加 3%生物炭)和 C2 处理(按照质量比添加 6%生物炭),添加量根据已有研究^[11]结果确定,同时设置不添加生物炭的对照,每个处理设 6 个重复(2 次非破坏性取样),共 18 盆,随机摆放。培养容器为底部直径 7.5 cm、高 14 cm 的 PVC 罐。每罐装入供试风干土壤 1 kg,并按处理添加相应比例的生物炭材料和底肥,底肥添加量为 N:0.2 g/kg,P₂O₅:0.15 g/kg,K₂O:0.2 g/kg(分别以 CO(NH₂)₂、KH₂PO₄、KCl 的形式混入土壤),充分混匀,然后浇水平衡 14 天后播种。每罐播种 10 粒,出苗后,每罐留取 4 株长势较好且生长均匀的小麦植株。生长期按土壤重量的百分比定量浇水。分别在小麦拔节期和成熟期取土壤和小麦植株样品,待小麦成熟后收获地上部,连茬种植玉米,玉米季未施底肥,出苗后每罐留取 1 株玉米,生长期按土壤重量的百分比定量浇水。成熟期取玉米植株和土壤样品。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品的采集 分别在小麦拔节期、成熟

期和玉米成熟期收集土壤样品,采用抖根法收集根际土,其余土壤视为非根际土。为了模拟田间小麦/玉米的种植方式,小麦收获后连茬播种玉米,因此小麦成熟期没有取根际土。土壤风干后研磨并过 1 mm 尼龙网筛,用于土壤 Cd、As 有效态含量的测定。

1.3.2 植株样品的采集 分别在小麦拔节期、成熟期和玉米成熟期进行取样,将植株整株挖出后分为根(小麦成熟期连茬播种玉米,故没有根系的样品)、秸秆、小麦籽粒和玉米的穗子(玉米穗子上没有籽粒),洗净后置于烘箱 65 ℃ 烘干,用不锈钢微型粉碎机粉碎后用于植株样品 Cd、As 含量的测定。

1.3.3 土壤有效镉和有效砷测定 土壤有效镉的测定采用 DTPA 浸提^[26]—电感耦合等离子体质谱仪(ICP—MS),土壤有效砷的测定采用 NH₄H₂PO₄ 浸提^[27]—原子荧光光度计测定。以国家标准物质 GBW 07442 进行准确度和精密度控制,镉回收率为 80%~90%,砷回收率为 80%~110%。

1.3.4 植株样品镉和砷含量测定 植株样品采用优级纯硝酸消煮^[28]后使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP—MS)测定植株不同部位镉砷含量。以国家标准物质小麦粉(GBW 07603)进行准确度和精密度控制,镉回收率为 80%~100%,砷回收率为 80%~90%。

1.4 数据统计分析

1.4.1 转运系数和富集系数

小麦籽粒或玉米穗/秸秆转运系数(TFs)=小麦籽粒或玉米穗中重金属含量(mg/kg)/小麦或玉米秸秆中重金属含量(mg/kg)

小麦籽粒或玉米穗/秸秆富集系数系数(BCFs)=小麦籽粒或玉米穗中重金属含量(mg/kg)/土壤中重金属含量(mg/kg)

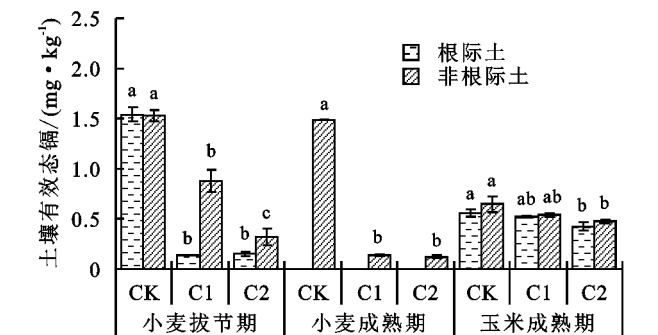
1.4.2 数据统计 采用 Microsoft Excel 2019 软件制作图表,使用 SPSS 19.0 软件进行数据分析,采用 LSD 方法进行显著性检验分析,差异显著水平为 5%。

2 结果与分析

2.1 生物炭对小麦和玉米根际/非根际土壤有效态镉砷含量的影响

2.1.1 小麦和玉米根际与非根际土壤中有效态镉含量 对于小麦而言,拔节期是其旺盛生长的养分最大效率期,因此选择该时期探究添加生物炭对土壤中镉砷有效性的影响。由图 1 可知,根际土和非根际土中有效态镉含量分别为 0.14~1.54,0.32~1.53 mg/kg。与 CK 相比,C1、C2 处理显著降低了根际土和非根际土中有效态 Cd 含量($p<0.05$),降幅分别为 90.98%,42.52%和 90.20%,79.02%。此外,非根际土中有效镉含量随着

生物炭施加量的增大而逐渐降低,但是根际土中有效镉含量在生物炭用量处理之间差异不显著;成熟期,因为模拟田间种植制度,玉米要连茬播种,即小麦根系需留在土壤中,因此,只有非根际土的样品。非根际土中有效镉含量为 0.12~1.45 mg/kg,与 CK 相比施加生物炭显著降低了其含量,C1 和 C2 处理的有效镉降幅分别为 90.85%和 91.71%;因为玉米生育期较短,所以仅在成熟期采集了样品。成熟玉米根际和非根际土壤有效镉含量分别为 0.42~0.56,0.47~0.65 mg/kg。随生物炭添加量增加,根际和非根际土中有效态 Cd 含量均呈逐渐降低的趋势,但是只有 C2 处理非根际土和根际土中有效态 Cd 含量与 CK 相比分别显著降低 24.41%和 26.68%。



注:图柱上方不同小写字母表示相同时期下根际/非根际土壤不同生物炭处理间差异性显著($p<0.05$)。下同。

图 1 生物炭对小麦和玉米根际/非根际土壤有效态镉含量的影响

2.1.2 小麦和玉米根际与非根际土壤中有效态砷含量 由图 2 可知,对于小麦而言,拔节期根际土和非根际土中有效态砷含量分别为 6.51~18.26,6.23~20.39 mg/kg。与 CK 相比,C1、C2 处理根际土有效态砷含量并未显著降低,可能与小麦根系对砷的吸收能力有关。但 C1、C2 处理显著降低了非根际土中有效态砷含量,降幅分别为 45.97%和 69.44%。此外,非根际土中有效砷含量随着生物炭施加量的增大而逐渐降低,C2 处理非根际土有效态砷含量显著低于 C1 处理;成熟期,非根际土中有效砷含量为 4.87~12.71 mg/kg,与 CK 相比仅 C1 处理显著降低成熟期非根际土有效态砷含量,降幅为 61.95%;成熟玉米根际和非根际土壤有效砷含量分别为 5.03~9.41,7.73~10.18 mg/kg。其中 C1 处理在一定程度上降低根际土和非根际土有效态砷含量,差异并不显著。综上所述,无论是拔节期还是成熟期,添加 3%的生物炭能显著降低小麦非根际土中有效态砷含量。

2.2 生物炭对小麦和玉米各部位镉砷含量的影响

2.2.1 小麦和玉米各部位镉含量 由图 3 可知,拔节期小麦根中镉含量为 5.91~7.97 mg/kg。小麦秸

秆镉含量为 1.28~3.12 mg/kg。与 CK 相比,C1、C2 处理并没有降低根中镉含量,仅 C1 处理显著降低小麦秸秆镉含量,降幅为 29.23%;成熟期,小麦秸秆镉含量为 2.81~2.95 mg/kg,对照与处理间无显著变化。对玉米而言,成熟期根中镉含量为 3.15~6.42 mg/kg,秸秆中镉含量为 0.34~1.60 mg/kg。与 CK 相比,C1 和 C2 处理显著降低了玉米根和秸秆中镉含量,降幅分别为 45.46%、50.41%和 45.07%、68.12%,但 C1 和 C2 处理之间差异均不显著。除此之外,玉米秸秆中镉含量远低于小麦,这是由于小麦从根向地上部转运镉的能力比玉米强造成的。

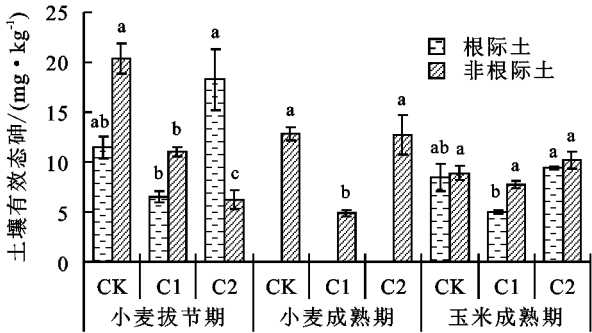


图 2 生物炭对小麦和玉米根际/非根际土壤有效态砷含量的影响

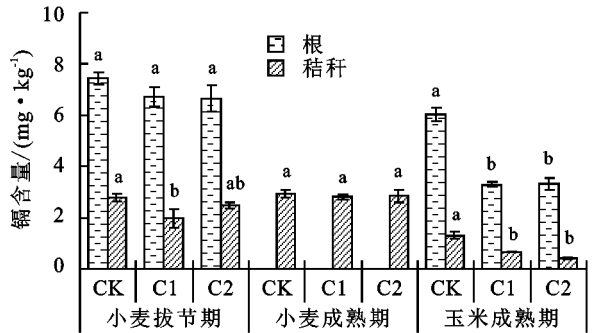


图 3 施用生物炭对小麦和玉米根系和秸秆中镉含量的影响

由图 4 可知,小麦籽粒中镉含量为 0.71~1.16 mg/kg,与 CK 相比,C1 和 C2 处理小麦籽粒镉含量分别降低 19.76%和 18.75%,但未达到显著性差异;对于玉米而言,穗子中镉含量为 0.09~0.81 mg/kg,生物炭的添加显著降低了玉米穗中镉含量($p<0.05$),C1 和 C2 处理的降幅分别为 85.67%和 61.28%,且 C1 处理比 C2 处理低 62.99%,修复效果较好。此外,C1 和 C2 生物炭处理的玉米穗中镉含量显著低于小麦籽粒,降幅分别为 88.17%、68.45%,这说明与玉米穗相比,小麦籽粒富集镉的能力更强。

2.2.2 小麦和玉米各部位砷含量 由图 5 可知,对小麦而言,拔节期小麦根砷含量为 17.83~26.06 mg/kg,小麦秸秆砷含量为 8.94~15.95 mg/kg,C1、C2 处理并未显著降低根和秸秆中砷含量;成熟期秸秆中砷含量为 31.65~63.28 mg/kg,C1 和 C2 处理与 CK

相比均显著降低秸秆中砷含量,降幅分别为 50.30%和 25.56%,其中 C1 处理秸秆砷含量显著低于 C2 处理。对玉米而言,成熟期根砷含量为 21.18~45.68 mg/kg,秸秆中砷含量为 1.27~3.06 mg/kg。与 CK 相比,C1 和 C2 处理根中砷含量降低了 46.90%和 37.53%,与 CK 相比,仅 C2 处理显著降低玉米秸秆砷含量,降幅为 40.19%。玉米秸秆中砷含量远小于小麦秸秆中砷含量,这是因为砷由根系向秸秆转运的能力小麦强于玉米。

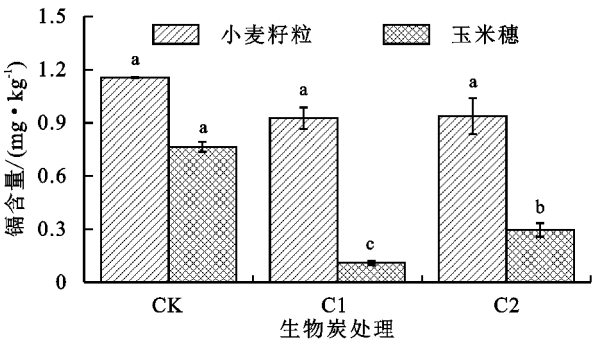


图 4 施用生物炭对小麦籽粒和玉米穗中镉含量的影响

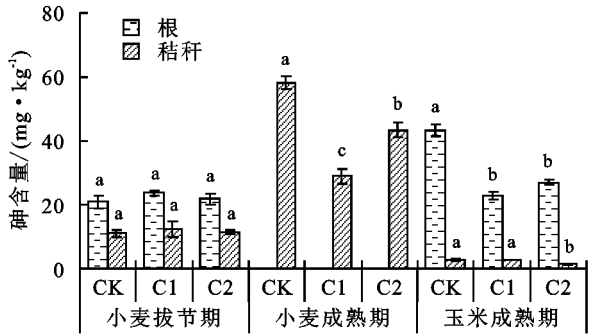


图 5 生物炭对小麦和玉米根系和秸秆中砷含量的影响

由图 6 可知,小麦籽粒中砷含量为 0.56~1.70 mg/kg。与 CK 相比,C1 和 C2 处理小麦籽粒砷含量均显著降低,降幅分别为 32.47%和 59.09%,且 C2 处理小麦籽粒砷含量比 C1 处理显著低 38.92%;玉米穗中砷含量为 0.09~7.80 mg/kg,与 CK 相比,C1 和 C2 处理玉米穗砷含量显著降低了 98.36%和 96.48%。由此可见,添加生物炭能够有效地减少砷在小麦籽粒和玉米穗的含量此外,C1 和 C2 处理,玉米穗中砷含量显著低于小麦籽粒,降幅分别为 88.52%、59.73%。生物炭对砷进入玉米穗的阻控效应更强。

2.3 生物炭对小麦和玉米不同部位镉砷富集能力的影响

由表 1 可知,对于小麦而言,添加生物炭并未显著影响小麦籽粒和秸秆对土壤中镉的富集。但是,生物炭显著降低了小麦籽粒和秸秆对土壤中砷的富集,其中 C1 和 C2 处理小麦籽粒、秸秆对砷的富集系数分别为 CK 的 56.88%和 41.28%及 54.59%和 74.44%,其中 C1 处理小麦秸秆对砷的富集系数显著低于 C2 处

理。总体来看,添加生物炭并没有明显阻控小麦秸秆和籽粒中镉的富集,但显著消减了砷在小麦秸秆和籽粒中的富集。综合考虑本研究的结果,一方面施用 3%或 6%的生物炭能显著降低土壤中镉有效性,但并没有影响小麦籽粒中镉的富集,因此,说明小麦体内镉转运能力可能是主要决定其在小麦籽粒中累积的主要因素;另一方面,施用生物炭对土壤中砷有效性的钝化能力虽然没有对镉的影响强,但是显著消减了秸秆和籽粒对砷的富集,说明可能是生物炭的添加明显降低了小麦体内砷的转运;对玉米而言,添加生物炭显著降低了玉米穗和秸秆对镉的富集能力,C1 和 C2 处理玉米穗对镉的富集系数仅为 CK 的 14.36%和 38.70%,玉米秸秆对镉的富集系数分别为 CK 的 49.60%和 31.88%。同样,添加生物炭显著降低了玉米穗对

砷的富集能力, C1 和 C2 处理的玉米穗对砷的富集系数很低,分别为 CK 的 1.57%和 3.53%。总之,施用生物炭不仅可以降低根际/非根际土壤中镉、砷有效性,并且可阻控镉砷在小麦籽粒和玉米穗中的富集,尤其是消减玉米穗中砷累积的效应最强。

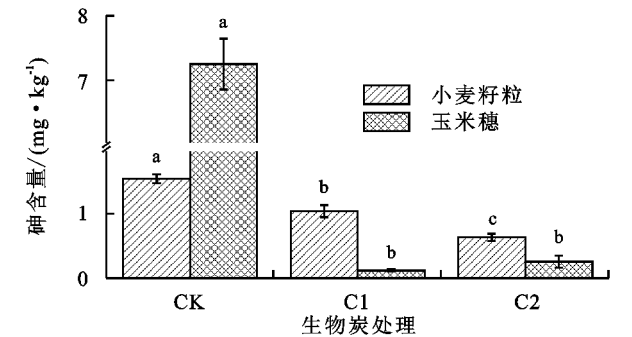


图 6 施用生物炭对小麦籽粒和玉米穗砷含量的影响

表 1 生物炭对成熟期小麦籽粒、玉米穗及其秸秆镉砷富集系数的影响

生物炭处理		BCF(籽粒或穗/土壤)		BCF(秸秆/土壤)	
		Cd	As	Cd	As
小麦	CK	0.287±0.016a	0.011±0.001a	0.778±0.0433a	0.410±0.015a
	C1	0.245±0.016a	0.006±0.001b	0.743±0.027a	0.224±0.001c
	C2	0.248±0.027a	0.005±0.000b	0.753±0.065a	0.305±0.017b
玉米	CK	0.202±0.008a	0.051±0.003a	0.348±0.031a	0.019±0.002a
	C1	0.029±0.003c	0.001±0.000b	0.173±0.006b	0.019±0.005a
	C2	0.078±0.010b	0.002±0.001b	0.111±0.009b	0.010±0.001b

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示成熟期转运/富集系数在生物炭处理间的差异性显著($p<0.05$)。下同。

2.4 生物炭对小麦和玉米体内镉、砷转运能力的影响

由表 2 可知,对小麦而言,添加生物炭并没有明显影响镉由秸秆向籽粒的转运,但是 C2 处理显著降低了砷由秸秆向籽粒的转运,降幅高达 44.44%。由于本研究中生物炭阻控镉由秸秆向籽粒转运的效应未达显著水平。因此,今后要注重从培育镉低转运低积累小麦品种方面开展相关研究以减弱镉在小麦体内的转运,这对保障小麦籽粒的食用安全至关重要;但是对玉米而言,添加生物炭处理均显著降低了镉、砷从秸秆到玉米穗的转运(C2 处理对镉转运的影响除外),其中 C1 处理 Cd 的转运系数为 CK 的 20.19%,As 的转运系数仅仅分别为 CK 的 0.88%和 4.69%,其中 C1 处理的玉米对镉砷由秸秆向穗子的转运系数均最低。

表 2 生物炭对小麦和玉米体内镉砷向籽粒或穗转运的影响

	生物炭 处理	TF(籽粒或穗/秸秆)	
		Cd	As
小麦	CK	0.367±0.003a	0.027±0.002b
	C1	0.323±0.028a	0.038±0.001a
	C2	0.343±0.062a	0.015±0.001c
玉米	CK	0.733±0.070a	3.391±0.849a
	C1	0.148±0.014b	0.030±0.003b
	C2	0.715±0.008a	0.159±0.045b

3 讨论

生物炭是农业废弃物高温烧制而成的一种新型的土壤调理剂。近年来,将生物炭作为一种新型土壤调理剂修复重金属污染土壤的相关研究逐渐成为热点。生物炭能通过物理吸附、官能团吸附、调整土壤 pH 等方式降低农田土壤重金属有效性,但由于自身高 pH 的特点,目前生物炭大多用于治理南方酸性稻田土壤,降低土壤重金属有效性和可食部位重金属的含量^[7],在石灰性农田土壤的应用案例较少。一般认为,生物炭加入农田土壤后,能够提高土壤 pH 从而降低镉的有效性,进而降低植物对土壤中镉的吸收^[14]。而生物炭对土壤中砷的有效性影响较为复杂,一方面由于自身孔隙结构丰富的特点能够在一定程度上吸附土壤中的砷,从而降低土壤中砷的有效性^[4];另一方面,生物炭提高土壤 pH 后会提高砷的有效性^[16]。因此,生物炭在石灰性镉砷复合污染土壤—作物中镉砷迁移和累积的影响成为进一步研究的关键问题。黄黎粤等^[22]向镉砷污染矿区土壤中添加 0.5%~5%的生物炭后,显著降低了小麦根际与非根际土壤中有效态镉含量,这与本研究的结果一致,即向镉砷复合污染农田石灰性土壤中添加 3%和 6%的生物炭均能显著

降低小麦季根际与非根际土壤有效态镉含量。本试验采用的生物炭是在 800~1 000℃ 条件下烧制而成的,含有的主要官能团包括 C—H、C=C 和—CH₂OH。而镉离子在生物炭的吸附作用主要发生在 C—C/C—H、C—O/C—OH 上^[12],因此土壤中的镉有效性降低可能是由于土壤中的镉被生物炭含有的官能团吸附所导致的。但添加生物炭对小麦秸秆和籽粒镉含量影响较小,添加 3%生物炭和添加 6%生物炭处理籽粒镉含量与 CK 相比仅降低 18.75%~19.76%,且差异没有达到显著水平。这可能是由于小麦对于镉的吸收转运能力较强,Zhang 等^[29]对小麦和水稻转运镉的能力进行研究发现,水稻中 1 个编码 P_{1B}—ATP_{ase} 转运蛋白的基因 *OsHMA3* 在液泡膜上表达,能够将根细胞中的镉转运至液泡中,通过这种方式降低镉向地上部的转运。而与水稻相比,小麦中镉由根向地上部的转运能力极强,一方面,由于小麦根中定位于液泡膜的 Cd 转运蛋白 TaHMA3 转运镉的能力较低,无法将根吸收的镉贮存在液泡中,因此导致根中的镉更容易转运至地上部;另一方面,可能是由于小麦土壤镉安全限量值较低,施用生物炭对土壤有效态镉含量的降低不足以减弱根系对镉的吸收和转运^[30]。Zong 等^[31]向玉米田间添加 2.25×10⁴ kg/hm² 生物炭能够显著降低土壤中镉的有效性以及镉在玉米中的累积,生物炭增大了镉在土壤中的吸附。本研究中添加生物炭处理玉米根和秸秆中镉含量均显著降低,分别比 CK 降低 45.07%~54.53%和 50.41%~60.12%,添加 3%和 6%的生物炭处理秸秆镉累积量分别是 CK 的 60.74%和 40.80%。秸秆向穗的转运系数(TF)也比 CK 降低 2.46%~79.81%,导致穗中镉含量显著降低。其中添加 3%生物炭处理效果最佳,说明生物炭添加主要通过降低植株对镉的吸收以及向可食部位的转运来达到修复效果。添加生物炭对玉米穗中镉含量降低效果明显大于对小麦。这可能是由于小麦对镉的吸收能力较强,研究表明,与 7 种农产品(青椒、黄瓜、豇豆、菠菜、花菜、西红柿、水稻)相比,小麦对土壤中 Cd 的富集能力是其他农产品的 3.79~12.50 倍^[30]。

添加生物炭同样能降低小麦籽粒中砷含量,已有研究^[32]表明,向稻麦体系中添加不同种类生物炭后,第 1 年小麦秸秆向籽粒中的砷转运系数与 CK 相比降低 9.33%~31.82%,第 2 年降低 28.54%~40.85%。由此可见,生物炭的添加可以通过抑制砷向可食部位转运来降低可食部位砷含量。本研究结果显示,生物炭添加显著降低了秸秆中砷含量,添加 6%生物炭处理秸秆向籽粒的转运系数仅为 CK 的 55.56%,最终导

致籽粒中砷含量显著降低为 CK 42.52%和 58.87%,其中添加 6%生物炭处理效果优于添加 3%生物炭。生物炭添加对玉米季土壤中有效态砷含量影响并不显著,但添加 3%生物炭和添加 6%生物炭处理显著降低成熟期玉米根中砷含量,添加 6%生物炭处理显著降低玉米秸秆中砷含量,由秸秆向穗的转运系数也显著降低,最终显著降低了玉米穗中砷含量(降低幅度为 96.47%~98.36%)。

综上所述,生物炭添加可以通过降低土壤有效态镉砷含量,特别是减弱镉、砷由秸秆向籽粒或穗的转运来降低小麦和玉米可食部位镉砷累积。此外,石灰性土壤添加生物炭降低可食部位砷累积的效果优于镉,且玉米优于小麦。

4 结论

(1)施用 3%、6%生物炭显著降低了小麦—玉米体系中石灰性土壤镉的有效性、玉米根—秸秆—穗中镉含量以及镉在玉米中的转运和累积能力,但没有明显阻控小麦中镉转运和籽粒中镉累积。

(2)施用 3%、6%生物炭一定程度可有效降低小麦—玉米体系中土壤砷有效性,但显著降低了小麦—玉米中砷由秸秆向籽粒的转运及其在小麦籽粒和玉米穗中的富集。

(3)综合分析生物炭对复合污染石灰性土壤—小麦/玉米体系中镉、砷迁移和累积的阻控效应,施用 3%生物炭较为适宜。

参考文献:

- [1] Wei L, Ding Q, Guo H M, et al. Forms and mobility of heavy metals/metalloids in sewage-irrigated soils in the North China Plain [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 21: 1-20.
- [2] Gong B, He E, Qiu H, et al. Interactions of arsenic copper and zinc in soil-plant system: Partition uptake and phytotoxicity [J]. Science of the Total Environment, 2020, 745: e140926.
- [3] Huang B Y, Zhao F J, Wang P, et al. The relative contributions of root uptake and remobilization to the loading of Cd and As into rice grains: Implications in simultaneously controlling grain Cd and As accumulation using a segmented water management strategy [J]. Environmental Pollution, 2022, 293: e118497.
- [4] 曹健,陈喆,吴箐,等.基施钢渣及生物炭结合水分管理阻控水稻镉砷吸收研究[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1475-1483.
- [5] 陈乐,詹思维,刘梦洁,等.生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu、Cd 有效性影响[J].水土保持学

- 报,2020,34(1):358-364.
- [6] Foster E J, Baas P, Wallenstein M D, et al. Precision biochar and inoculum applications shift bacterial community structure and increase specific nutrient availability and maize yield [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 151: e103541.
- [7] 李荭荭, 李洲, 陈春乐, 等. 生物炭对水稻—再生稻体系吸收土壤中 Cd 和 Pb 的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 378-384.
- [8] 郭琴波, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对稻田有机炭矿化及酶活性影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 369-374.
- [9] Luo C Y, Yang J J, Chen W, et al. Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Results from field experiments [J]. *Geoderma*, 2020, 369: e114323.
- [10] Kumarathilaka P, Bundschuh J, Seneweera S, et al. Iron modification to silicon-rich biochar and alternative water management to decrease arsenic accumulation in rice [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: e117661.
- [11] 韦亮, 孙立永, 田雪, 等. 干湿交替下生物炭对复合污染土壤中镉砷有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 341-347.
- [12] 黄柱坚, 朱子鹭, 吴学深, 等. 皇竹草生物炭的结构特征及对重金属吸附作用机制[J]. *环境化学*, 2016, 35(4): 766-772.
- [13] 吴愉萍, 王明湖, 席杰君, 等. 不同农业废弃物生物炭及施用量对土壤 pH 值和保水保氮能力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 87-92.
- [14] 任超, 朱利文, 李竞天, 等. 不同钝化剂对弱酸性镉污染土壤的钝化效果[J]. *生态与农业环境学报*, 2022, 38(1): 8-14.
- [15] Ning Y Z, Jun Q, Ting M Y, et al. Arsenic immobilization through regulated ferrololysis in paddy field amendment with bismuth impregnated biochar [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 993-1001.
- [16] 王志刚, 王永杰, 靳雯佳, 等. 2 种生物炭对稻米中砷累积的影响研究[J]. *地球环境学报*, 2021, 12(3): 313-321.
- [17] 秦松岩, 夏迪, 赵立新. 污泥基生物炭对砷污染土壤的稳定修复[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(11): 1481-1486.
- [18] Wu J Z, Huang D, Liu X M, et al. Remediation of As (III) and Cd(II) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 348: 10-19.
- [19] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤 As—Cd 生物有效性及稻米累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 696-704.
- [20] 林欣颖, 谭伟, 历红波. 稻米镉积累的影响因素与阻控措施[J]. *环境化学*, 2020, 39(6): 1530-1543.
- [21] 刘雅, 辜娇峰, 周航, 等. 谷壳灰对稻田土壤镉、砷生物有效性及糙米镉、砷累积的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(7): 2581-2588.
- [22] 黄黎粤, 丁竹红, 胡忻, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 348-355.
- [23] 董同喜, 杨海雪, 李花粉, 等. 华北农田小麦—玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(4): 355-365.
- [24] 孙洪欣, 赵全利, 薛培英, 等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 2068-2074.
- [25] 孙洪欣, 薛培英, 赵全利, 等. 镉、铅积累与转运在冬小麦品种间的差异[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(8): 1161-1167.
- [26] 郑坤, 赵全利, 耿丽平, 等. 不同水分条件下外源菌剂对污染水稻土中硅、砷有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 262-266, 271.
- [27] 刘拓, 王萌, 陈世宝. 基于小麦籽粒降 Cd 率及土壤 Cd 形态变化评价蚯蚓对 Cd 污染土壤的修复效果[J]. *地学前缘*, 2019, 26(6): 75-81.
- [28] Temmerman L D, Waegeneers N, Ruttens A, et al. Accumulation of atmospheric deposition of As, Cd and Pb by bush bean plants [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 199: 83-88.
- [29] Zhang L X, Gao C, Chen C, et al. Overexpression of rice *OsHMA3* in wheat greatly decreases cadmium accumulation in wheat grains [J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(16): 10100-10108.
- [30] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4647-4653.
- [31] Zong Y T, Xiao Q, Malik Z, et al. Crop straw-derived biochar alleviated cadmium and copper phytotoxicity by reducing bioavailability and accumulation in a field experiment of rice-rape-corn rotation system [J]. *Chemosphere*, 2021, 280: e130830.
- [32] 沈浩然. 稻麦轮作体系下不同钝化材料对土壤镉砷复合污染修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.