

赵伟,丁弈君,孙泰朋,等. 生物质炭对汞污染土壤吸附钝化的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):192-196.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.052

# 生物质炭对汞污染土壤吸附钝化的影响

赵伟,丁弈君,孙泰朋,田宗泽,郝帅,王宏燕,孙岩,高敬尧,袁佳慧  
(东北农业大学,黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:**研究生物质炭对黑土土壤 Hg 污染的吸附、钝化作用。以受汞污染土壤为研究对象,以生物质炭不同梯度施用量为处理,通过盆栽试验采用 HNO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 混合酸水浴一次消解的方法对土壤中 Hg 的总量、淋溶液以及植物中重金属的含量进行研究,采用 HPLC 反相 C<sub>18</sub> 柱分离、ICP - MS 检测甲基汞含量。添加 HgCl<sub>2</sub> 6 mg/kg 后,生物质炭添加量 1% 处理土壤中 Hg 含量比例由 57.9% 提高到 66.1%,油菜中汞含量所占比例由 14.5% 下降到 11%,降低 3.5 百分点;淋溶液中汞含量占比由 27.5% 下降到 22.9%,降低 4.4 百分点;土壤中的甲基汞含量下降到 34.9%。以外源添加 HgCl<sub>2</sub> 6 mg/kg 后,进入土壤中的汞含量由 55.00% 上升到 77.67%,植物中汞含量由 14.67% 下降到 2.77%,淋溶液中汞含量由 27.1% 下降到 16.7%。生物质炭的添加对 Hg 在土壤、植物体和淋溶液中的分布具有显著的影响,随着生物质炭添加量的增加,钝化在土壤中的重金属 Hg 越多,有效降低了植物体内、淋溶液的重金属 Hg 的含量,降低了土壤中甲基汞的含量,降低了土壤毒性,提高重金属 Hg 的钝化率,增加了土壤中重金属 Hg 的含量,生物质炭的施用可有效修复和改良重金属污染土壤。

**关键词:**生物质炭;汞;土壤淋溶液;甲基汞;吸附特性;土壤修复

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0192-05

重金属汞是土壤中一种高污染的元素,在自然条件下容易与化学物质和微生物发生甲基化反应,从而生成甲基汞或二甲基汞等毒性更强的汞形态。它们在土壤中含量超过一定限度后,会对土壤上(中)的微生物、动物以及作物等产生危害,影响农作物品质,通过食物链富集对人体健康造成威胁。因此,探讨污染土壤中汞的吸附行为及甲基化效应,对治理汞污染的土壤,控制土壤中汞的有效性有着实际意义<sup>[1]</sup>。

生物炭作为一类新型环境功能材料引起广泛关注,在温室气体减排、农业土壤改良、农作物增产以及污染土壤修复等方面有着巨大的应用潜力,成为近年来的研究热点<sup>[2-6]</sup>。施入生物炭,能够增大土壤田间持水量,增加土壤肥力,提高作物产量,改善土壤性质<sup>[7]</sup>。此外,生物炭对重金属离子有较好的吸附固定作用,可降低土壤中重金属的迁移性和有效性,从而降低植物体内重金属含量<sup>[8-10]</sup>。陈再明等研究发现,用水稻秸秆制备的生物炭对 Pb<sup>2+</sup> 的最大吸附量分别为 65.3、85.7 mg/kg,是原秸秆生物质的 5~6 倍,活性炭的 2~3 倍<sup>[11]</sup>。土壤中施入生物炭后,Zn 和 Cd 的浓度明显下降,植物毒害也显著降低<sup>[12]</sup>,土壤对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附量增大,且随生物炭量增加,吸附量显著增加。生物炭能降低土壤中 Hg 的酸可提取态含量,因而降低重金属的生物有效性,对重金属表现出很好的固定效果。林爱军等采用分级提取的方法,研究了施加骨炭对污染土壤重金属的固定效果<sup>[13]</sup>。另外,竹炭对土

壤和水中重金属 Cu、Hg、Ni、Cr 等都有一定的吸附作用<sup>[14-18]</sup>,对土壤中的 Cd 污染也表现出良好的吸附效果。目前,关于利用生物质炭对受汞污染的黑土吸附钝化的研究还鲜见报道。本试验主要研究生物质炭对黑土土壤 Hg 污染的吸附、钝化作用,以受汞污染土壤为研究对象,以生物质炭不同梯度施用量为处理,通过盆栽试验采用 HNO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 混合酸水浴一次消解的方法对土壤中 Hg 的总量、淋溶液以及植物中 Hg 的含量进行研究,采用 HPLC 反相 C<sub>18</sub> 柱分离及 ICP - MS 检测甲基汞含量,旨在探讨生物炭对污染土壤中重金属汞的吸附能力,以期受重金属 Hg 污染土壤的修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

土壤取自东北农业大学香坊植物试验实习基地大田,土壤类型为黑土,使用土壤采集器以“S”形随机采集 0~20 cm 的多个耕作层土壤,混合后带回实验室,经风干、除杂、研磨后,过 2.0 mm 筛备用,土壤基本理化性质见表 1。生物质炭为实验室在 500 ℃ 条件下热裂解玉米秸秆制得,生物质炭基本的理化性质见表 2。供试植物为菠菜。

表 1 土壤理化性质

理化性质	含量
pH 值	6.79
CEC( cmol/kg)	27.64
全磷( g/kg)	0.68
全氮( g/kg)	1.41
有机质( g/kg)	13.18

### 1.2 试验设计

将所取的土样平铺在塑料薄膜上风干、压碎,剔除根系和

收稿日期:2016-03-05

基金项目:国家环境部公益项目(编号:201309036)。

作者简介:赵伟(1971—),女,河北乐亭人,博士,教授,主要从事农业生态学和土壤生态学的研究。E-mail: niersi7105@sina.com。

通信作者:王宏燕,教授,主要从事生态学方面的研究。E-mail: why220@126.com。

表 2 生物质炭理化性质

理化性质	含量
pH 值	9.57
CEC( cmol/kg)	18.40
比表面积( $\text{m}^2/\text{g}$ )	186.70
Hg(mg/kg)	—
有机碳(g/kg)	277.20

石块,过粗筛(3 mm×3 mm)备用。称取 2 kg 过筛的土放入花盆中。氯化汞以溶液的形式加入土中,分别加入盆 H0、H1、H2、H3、H4 中,使得盆中汞的含量为 0、1、2、3、6 mg/kg。把菠菜种子撒入 H0、H1、H2、H3、H4 盆中,再向每盆中添加为土壤质量的 0%、1%、3%、5%、7% 的生物炭。菠菜生长期间,每 2 d 浇 1 次去离子水,在盆底接淋溶液。菠菜成熟后,采集菠菜样品和土壤样品,测定土壤中和菠菜中汞的含量。共 21 个处理,每处理 3 次重复,试验设计见表 3。

表 3 试验设计

生物炭含量 (%)	汞含量(mg/kg)				
	0	1	2	3	6
0	CK	C0Hg1	C0Hg2	C0Hg3	C0Hg4
1		C1Hg1	C1Hg2	C1Hg3	C1Hg4
3		C2Hg1	C2Hg2	C2Hg3	C2Hg4
5		C3Hg1	C3Hg2	C3Hg3	C3Hg4
7		C4Hg1	C4Hg2	C4Hg3	C4Hg4

### 1.3 测定方法

测定植物总汞的方法为直接加热酸消解法,包括  $\text{HNO}_3 -$

$\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_5$  法、 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$  法和  $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HClO}_4$  法。由于这些方法消解过程中试剂加入比例调配操作繁琐,因此,改  $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4$  混合酸水浴一次消解,降低了取样量,简化了操作步骤。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭对土壤淋溶液中的 Hg 含量的影响

生物质炭对重金属具有超强的吸附能力,从图 1 可以看出,1%、3%、5%、7% 的生物质炭处理淋溶液中的 Hg 含量均低于对照,其中,淋溶液中的 Hg 含量下降最多的是 7% 的生物质炭处理,不同处理淋溶液中的 Hg 含量下降排列顺序为 7% 的生物质炭处理 > 5% 的生物质炭处理 > 3% 的生物质炭处理 > 1% 的生物质炭处理。其中添加 1 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg1、C2Hg1、C3Hg1、C4Hg1 处理淋溶液中的 Hg 含量比 C0Hg1 处理淋溶液中的 Hg 含量分别下降了 7.7%、10.1%、21.2%、25.3%。添加 2 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg2、C2Hg2、C3Hg2、C4Hg2 处理淋溶液中的 Hg 含量比 C0Hg2 处理淋溶液中的 Hg 含量分别下降了 6.5%、13.3%、17.9%、24.8%。添加 3 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg3、C2Hg3、C3Hg3、C4Hg3 处理淋溶液中的 Hg 含量比 C0Hg3 分别下降了 25.6%、34.3%、43.6%、47.5%。添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理淋溶液中的 Hg 含量比 C0Hg4 分别下降了 29.9%、34.7%、38.8%、46.1%。表明生物质炭的施用,可有效降低淋溶液中重金属汞的含量,并且随着生物质炭量的增加,淋溶液重金属汞下降的比例也随之提高。

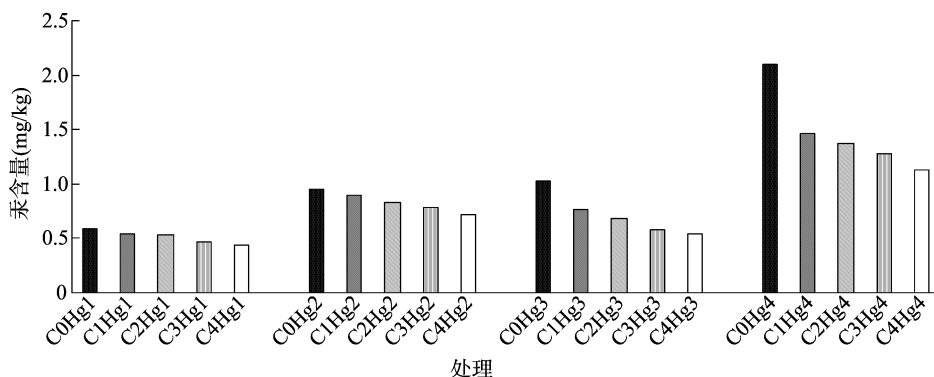


图1 添加不同量的生物质炭对土壤淋溶液中的 Hg 含量的影响

### 2.2 生物质炭对土壤中总汞含量的影响

生物质炭对土壤中重金属有着吸附钝化的作用。从图 2 可以看出,1%、3%、5%、7% 的生物质炭处理土壤中的总 Hg 含量均高于对照,其中土壤中的总 Hg 含量上升最多的是 7% 的生物质炭处理,不同处理土壤中的总 Hg 含量排列顺序为 7% 的生物质炭处理 > 5% 的生物质炭处理 > 3% 的生物质炭处理 > 1% 的生物质炭处理。

添加 1 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  时, C1Hg1、C2Hg1、C3Hg1、C4Hg1 处理土壤中的总 Hg 含量比 C0Hg1 处理土壤中的总 Hg 含量分别上升了 10.2%、14.2%、21.5%、26.2%。添加 2 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg2、C2Hg2、C3Hg2、C4Hg2 处理土壤中的总 Hg 含量比 C0Hg2 处理土壤中的总 Hg 含量分别上升了 16.9%、23.9%、27.4%、33.3%。添加 3 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg3、C2Hg3、C3Hg3、C4Hg3 处理土壤中的总 Hg 含量比 C0Hg3 处

理土壤中的总 Hg 含量分别上升了 19.3%、26.8%、31.0%、33.9%。添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理土壤中的总 Hg 含量比 C0Hg4 处理土壤中的总 Hg 含量分别上升了 20.9%、27.6%、30.7%、35.0%。

### 2.3 生物质炭对土壤中甲基汞含量的影响

甲基汞是汞形态中最具毒性的一种,通过食物链可以危害人体健康,对人体中枢神经系统造成不可逆的损害,环境与生态问题使得检测甲基汞迫在眉睫。从图 3 可以看出,添加 1%、3%、5%、7% 的生物质炭时,汞污染土壤中甲基汞含量均低于对照,其中土壤中的甲基汞含量下降比例最大的是添加 7% 生物质炭处理。

添加 1 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  时, C1Hg1、C2Hg1、C3Hg1、C4Hg1 处理土壤中甲基汞含量比 C0Hg1 处理土壤中的甲基汞含量分别下降了 6.0%、8.5%、4.4%、10.2%。添加 2 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ,

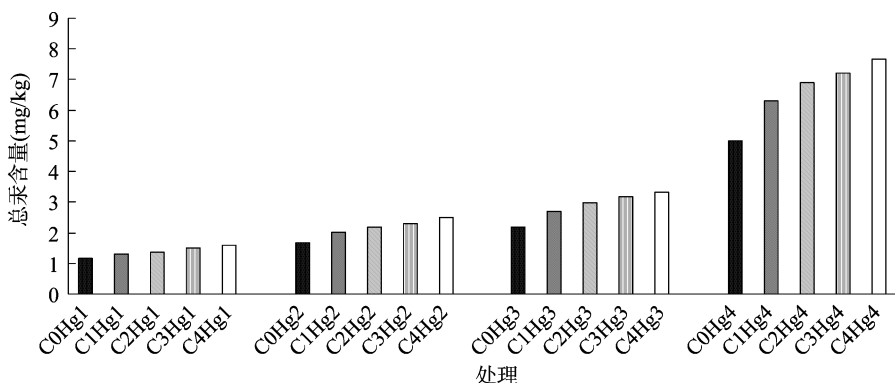


图2 添加不同量的生物质炭对土壤中总 Hg 含量的影响

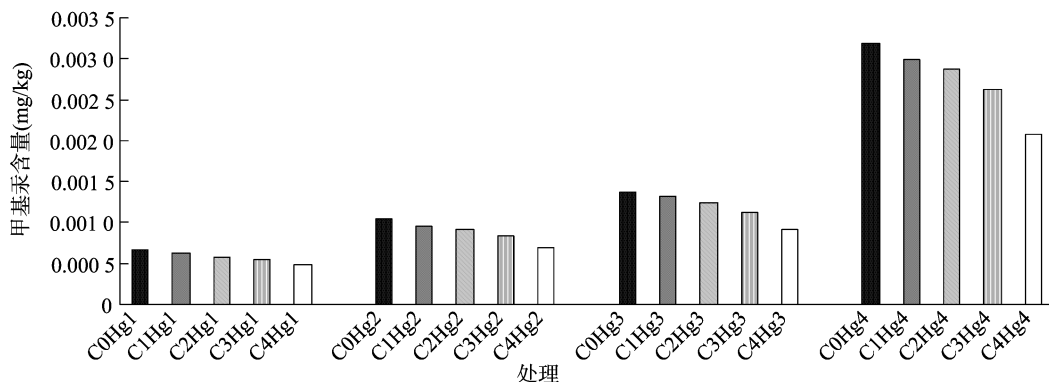


图3 添加不同量的生物质炭对土壤中甲基汞含量的影响

C1Hg2、C2Hg2、C3Hg2、C4Hg2 处理土壤中的甲基汞含量比 C0Hg2 处理土壤中的甲基汞含量分别下降了 8.2%、4.6%、8.5%、16.9%。添加 3 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，C1Hg3、C2Hg3、C3Hg3、C4Hg3 处理土壤中的甲基汞含量比 C0Hg3 处理土壤中的甲基汞含量分别下降了 4.2%、5.7%、9.3%、19.3%。添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理土壤中的甲基汞含量比 C0Hg4 处理土壤中的甲基汞含量分别下降了 6.1%、4.1%、8.5%、20.9%。

#### 2.4 生物质炭对植物体中汞含量的影响

从图 4 可以看出，添加 1%、3%、5%、7% 的生物质炭时，植物体中汞含量均低于对照，其中植物中的汞含量下降比例

最大的是添加 7% 生物质炭处理。添加 1 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  时，C1Hg1、C2Hg1、C3Hg1、C4Hg1 处理植物体中的汞含量分别下降了 17.0%、36.8%、47.3%、65.8%。添加 2 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，C1Hg2、C2Hg2、C3Hg2、C4Hg2 处理植物体中的汞含量比 C0Hg2 处理植物体中的汞含量分别下降了 2.1%、61.8%、66.8%、73.1%。添加 3 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，C1Hg3、C2Hg3、C3Hg3、C4Hg3 处理植物体中的汞含量比 C0Hg3 处理植物体中的汞含量分别下降了 13.3%、26.0%、41.2%、51.6%。添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理植物体中的汞含量比 C0Hg4 处理植物体中的汞含量分别下降了 13.3%、26.0%、41.2%、51.6%。

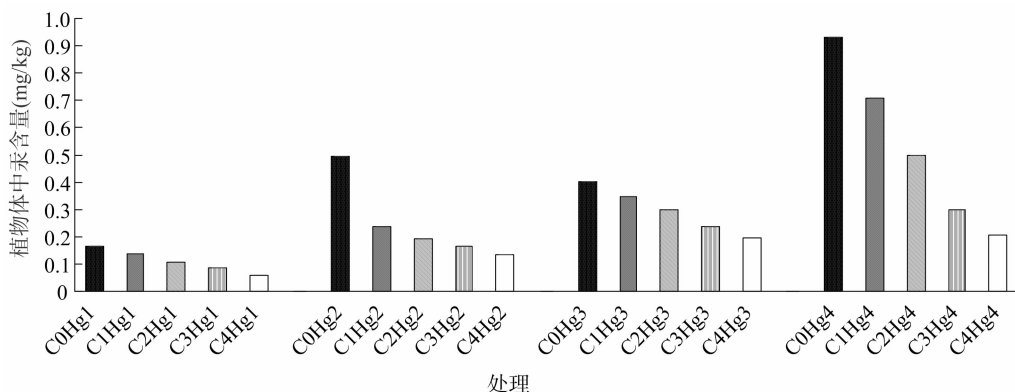


图4 添加不同量的生物质炭对植物中汞含量的影响

#### 2.5 生物质炭对重金属汞在植物—土壤中迁移的影响

重金属污染土壤后在土壤中存留时间长、移动性差、不能被微生物降解，并且通过水体及植物体最终对人类健康造成

危害，造成污染后治理的难度较大。从表 4 可以看出，添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ ，进入不加生物质炭 C0Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 3.30 mg/kg，植物中 Hg 的含量为 0.88 mg/kg，淋溶液

中 Hg 的含量为 1.63 mg/kg; 大气中 Hg 的含量为 0.19 mg/kg。添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , 进入生物质炭 1% 的 C1Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 3.82 mg/kg, 植物中 Hg 的含量为 0.66 mg/kg, 淋溶液中 Hg 的含量为 1.34 mg/kg; 大气中 Hg 的含量为 0.18 mg/kg; 加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , 进入生物质炭 3% 的 C2Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 4.13 mg/kg, 植物中 Hg 的含量为 0.44 mg/kg, 淋溶液中 Hg 的含量为 1.24 mg/kg; 大气中 Hg 的含量为 0.19 mg/kg; 加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , 进入生物质炭 5% 的 C4Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 4.42 mg/kg, 植物中 Hg 的含量为 0.25 mg/kg, 淋溶液中 Hg 的含量为 1.15 mg/kg; 大气中 Hg 的含量为 0.18 mg/kg。加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$ , 进入生物质炭 7% 的 C4Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 4.66 mg/kg, 植物中 Hg 的含量为 0.16 mg/kg, 淋溶液中 Hg 的含量为 1.00 mg/kg; 大气中 Hg 的含量为 0.18 mg/kg。生物质炭的添加对 Hg 在土壤、植物体和淋溶液中的分布具有明显的影响作用, 随着生物质炭添加量的增加, 将重金属 Hg 钝化在土壤中, 可有效降低植物体内、淋溶液的重金属 Hg 的含量, 增加土壤中重金属 Hg 含量, 提高重金属 Hg 的钝化率, 从而将重金属 Hg 以不易被植物吸收和利用的惰性状钝化在土壤中, 说明生物质炭的施用具有修复和改良重金属污染土壤的特征。

表 4 不同梯度生物质炭影响下土壤、植物、淋溶液中重金属含量

处理	重金属含量(mg/kg)		
	土壤	植物	淋溶液
C0Hg4	3.30	0.88	1.63
C1Hg4	3.82	0.66	1.34
C3Hg4	4.13	0.44	1.24
C5Hg4	4.42	0.25	1.15
C7Hg4	4.66	0.16	1.00

### 3 结论与讨论

施入土壤中生物质炭的多少会影响淋溶液中重金属汞的多少。以外源添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  为例, C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理淋溶液中的 Hg 含量比 C0Hg4 分别下降了 29.9%、34.7%、38.8%、46.1%, 添加生物质炭 7% 时, 淋溶液中汞含量下降最多。淋溶液中重金属汞会随生物质炭施入量的增加而降低, 而随着施入生物炭比例的增高, 淋溶液中 Hg 含量下降的比例增高。

随着生物炭施加量的增加, 土壤对于重金属的表现吸附能力逐渐增加。以外源添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  为例, C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理土壤中的总 Hg 含量比 C0Hg4 处理土壤中的总 Hg 含量分别上升了 20.9%、27.6%、30.7%、35.0%, 其中生物质炭添加 7% 时, 土壤中总汞含量最多, 其次为生物质炭添加 5%。生物质炭施入越多, 生物炭能更明显地增加土壤对重金属的表现吸附能力。

生物质炭施入土壤中会影响土壤中甲基汞含量的变化。以外源添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  为例, C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理土壤中的甲基汞含量比 C0Hg4 处理土壤中的甲基汞含量分别下降了 6.1%、4.1%、8.5%、20.9%, 其中生物质炭添加 7% 时, 效果尤为明显, 甲基汞会随着生物质炭施入量增加而减少, 降低了汞金属在土壤中的毒性。

以外源添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  为例, C1Hg4、C2Hg4、C3Hg4、C4Hg4 处理植物中汞含量比 C0Hg4 处理植物中的汞含量分别下降了 13.3%、26.0%、41.2%、51.6%。生物炭施入土壤中, 会使得土壤中重金属汞被固定在土壤中, 降低土壤中重金属的生物有效性, 使得植物中汞含量大大降低。

以外源添加 6 mg/kg  $\text{HgCl}_2$  为例, 进入生物质炭 7% 的 C4Hg4 处理土壤中 Hg 的含量为 4.66 mg/kg, 植物中 Hg 的含量为 0.16 mg/kg, 淋溶液中 Hg 的含量为 1.00 mg/kg, 大气中 Hg 的含量为 0.18 mg/kg。生物质炭施入受汞污染土壤中后, 土壤中汞的含量增高, 淋溶液和植物中汞的含量减少, 说明生物质炭可以将重金属汞固化在土壤中, 从而降低其生物有效性, 使得植物吸收较少量的重金属汞, 降低土壤毒性。

添加生物质炭后, 重金属污染土壤 pH 值不同程度地提高, 并使 Hg 通过络合、沉淀等作用被固定下来; 无论在单一污染还是在复合污染中, 生物炭对重金属有很好的固定效果, 能够降低 Hg 的生物有效性。Uchimiya 等发现, 添加生物质炭引起土壤 pH 值升高, 可以提高土壤对 Hg 和 Ni 的固定效果<sup>[19]</sup>。本研究结果表明, 施入土壤生物质炭的多少会影响土壤对重金属汞的钝化作用, 以外源汞添加 1 mg/kg 为例, 施入 0.1%、3%、5%、7% 的生物质炭, 土壤中的 Hg 含量上升了 10.2%、14.2%、21.5%、26.2%, 本结论与朱庆祥的研究结果<sup>[20]</sup>一致。

汞的一个特点是能够在生物体之内积聚(生物累积), 并能在食物链中转移(生物放大)。就甲基汞而言, 由于其具有高脂溶性、在植物体内难以分解的特性, 毒性要强于无机汞, 比其他形式的汞累积程度更大。它可以通过植物的迁移转化, 造成湿地中汞的迁移, 并可能进入食物链, 威胁到水生生物和人类的健康。一些土壤有机质(如秸秆等植物残体)可通过提供活性碳源而提高微生物活性, 促进汞的甲基化<sup>[21]</sup>。在本研究中生物质炭显著抑制土壤中汞的甲基化, 可能是无机汞与生物质炭络合产生较为稳定的大分子络合物, 难以被甲基化细菌所利用, 生物质炭的加入导致土壤中有机结合态汞显著上升, 研究结果为汞-有机质络合抑制汞甲基化提供更为直接的证据。本研究中发现通过对受污染土壤中施入不同梯度的生物质炭来检验土壤对甲基汞的吸附能力, 发现生物质炭施入的多少影响了土壤中甲基汞的含量, 生物质炭施入土壤中的多少会影响土壤中甲基汞含量的变化, 甲基汞会随着生物质炭施入量增加而减少。以外源汞添加 1 mg/kg 为例, 施入 0.1%、3%、5%、7% 的生物质炭, 土壤中的甲基汞含量下降了 6.0%、8.5%、4.4%、10.2%, 生物质炭施入受重金属汞污染的土壤中, 将易被吸收的汞形态转换为不易被吸收汞的形态, 因此, 受污染土壤中甲基汞的含量随着施入生物炭而减少, 降低了汞金属在土壤中的毒性。

土壤中的汞可以部分为植物所吸收。汞在植物体内的富集随土壤污染程度的增加而增加。一般情况下, 植物主要是通过根系从土壤吸收汞, 但也可以通过叶、茎的表面直接吸收大气中的汞。前人研究表明, 施加生物炭能减轻重金属毒害, 提高植物生长<sup>[22]</sup>。刘阿梅研究表明, 添加生物炭后, 荷花各器官内镉含量降低作用非常明显, 首先, 荷花各个器官对镉都有一定的富集作用, 在基质中添加 3 mg/kg 镉离子的处理组中, 荷藕、荷梗、荷叶的镉含量分别是对照组的 12.81 倍、

17.35 倍、7.56 倍。随着添加生物炭比例的增加,荷藕、荷梗、荷叶的镉含量都是相应地减少<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,随着土壤中汞含量的增加,可被植物吸收富集的汞的有效态含量增加,但随着生物质炭的施入,降低了土壤重金属的生物有效性,使得植物中所富集的汞含量有所下降,外源汞添加 1 mg/kg、0.1%、3%、5%、7% 的生物质炭,植物中的 Hg 含量分别下降了 17.0%、23.8%、16.6%、35.0%。

越来越多的研究表明,生物炭在污染治理修复领域具有巨大潜力,应用前景广阔<sup>[24-25]</sup>。目前,在生物炭修复重金属污染物方面仍有很大的研究空间,今后应该在以下几个方面加强研究:(1)生物炭对土壤修复效果方面的研究,大多是只利用单一一种生物炭或是只针对性质相似的重金属进行修复研究。今后工作应注重研究生物炭对多种不同类型重金属(如二价重金属和砷)的修复效果,同时可开发多种形式的生物炭复合材料,如各种生物炭复合或生物炭与其他吸附剂复合,以求得到土壤中重金属修复的最佳效果。(2)生物炭对土壤中重金属的吸附机理方面的研究虽已取得一定进展,但是对生物炭修复土壤中复合污染物的作用机理还有待进一步研究。(3)目前,有部分学者<sup>[26-27]</sup>提出生物炭本身具有一定毒性,若原料中含有一些重金属或者有机物超标,制成的生物炭可能会产生有毒有害物质,这些与制备生物炭时选取的原料、热解的温度、时间和热解的方式都有关。因此,对生物炭应用的研究也应着重此方面,确保不会对环境带来更大的伤害。

#### 参考文献:

- [1]涂强.从自然科学基金资助项目看我国环境化学进展和趋势[J].化学进展,1997,9(4):431-436.
- [2]Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems; estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(2):827-833.
- [3]Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London: Earthscan, 2009: 107-157.
- [4]Cao X D, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14):5222-5228.
- [5]Cao X D, Ma L, Gao B, et al. Dairy-Manure derived biochar effectively sorbs Lead and atrazine[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9):3285-3291.
- [6]郭文娟,梁雪峰,林大松,等.土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J].环境科学,2013,34(9):3716-3721.
- [7]刘玉学,刘微,吴伟祥,等.土壤生物质炭环境行为与环境效应[J].应用生态学报,2009,20(4):977-982.
- [8]Park J H, Choppala G K, Bolan N S, et al. Biochar reduces the bio-availability and phytotoxicity of heavy metals[J]. Plant and Soil, 2011, 348(1/2):439-451.
- [9]Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010, 78(9):1167-1171.
- [10]van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2):235-246.
- [11]陈再明,万还,徐义亮,等.水稻秸秆生物炭对重金属 Pb<sup>2+</sup> 的吸附作用及影响因素[J].环境科学学报,2012,32(4):769-776.
- [12]Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Eyles J L. Effects of bio-char and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(suppl 1):2282-2287.
- [13]林爱军,张旭红,苏玉红,等.骨炭修复重金属污染土壤和降低基因毒性的研究[J].环境科学,2007,28(2):232-237.
- [14]Jiang T Y, Jiang J, Xu R K, et al. Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar[J]. Chemosphere, 2012, 89(3):249-256.
- [15]Skjemstad J O, Reicosky D C, Wilts A R, et al. Charcoal carbon in US agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4):1249-1255.
- [16]Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11):1477-1488.
- [17]张爱莉,朱义年,纪锐琳,等.竹炭对氨氮的吸附性能及其影响因素的研究[J].环境科学与技术,2008,31(6):19-21,50.
- [18]马建伟,王慧,罗启仕.电动力学-新型竹炭联合作用下土壤镉的迁移吸附及其机理[J].环境科学,2007,28(8):1829-1834.
- [19]Uchimiya M, Lima I M, Thomas Klasson K, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu II, Cd II, Ni II, and Pb II) by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(9):5538-5544.
- [20]朱庆祥.生物炭 Pb、Cd 污染土壤的修复试验研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [21]Windhammyers L, Marvindipasquale M, Kakouros E, et al. Mercury cycling in agricultural and managed wetlands of California, USA: seasonal influences of vegetation on mercury methylation, storage, and transport. [J]. Science of the Total Environment, 2014, 484(24):308-318.
- [22]Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2010, 78(9):1167-1171.
- [23]刘阿梅.生物炭对植物生长发育及镉吸收的影响[D].湘潭:湖南科技大学,2014.
- [24]杨晓庆,侯仔尧,常梦婷,等.生物炭对镉污染土壤的修复研究[J].江苏农业科学,2015,43(6):335-337.
- [25]杨晓庆,侯仔尧,常梦婷,等.改良剂对 Cd 污染土壤的修复作用[J].江苏农业科学,2015,43(7):423-425.
- [26]Park J H, Choppala G K, Bolan N S, et al. Biochar reduces the bio-availability and phytotoxicity of heavy metals[J]. Plant and Soil, 2011, 348(1/2):439-451.
- [27]Jing Y D, He Z L, Yang X E. Adsorption-desorption characteristics of mercury in paddy soils of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(2):680-688.