

生物炭与肥料复配对土壤重金属镉污染钝化修复效应

王期凯¹, 郭文娟^{2,3}, 孙国红^{1*}, 林大松^{2,3}, 徐应明^{2,3}, 刘静茹¹, 于士雷¹

(1.天津农学院工程技术学院, 天津 300384; 2.农业部环境保护科研监测所, 农田重金属污染修复创新团队, 天津 300191; 3.农业部产地环境质量重点实验室, 天津 300191)

摘要:通过田间实验,研究了生物炭与有机肥及氮磷钾复合肥复配施用对菜地土壤重金属镉污染钝化修复效应,并探讨了作用机制。结果表明,菜地土壤添加不同钝化材料可显著降低油麦菜地上可食部位 Cd 的累积量,降幅可达 32.6%~54.8%,各钝化处理的菜地土壤有效态 Cd 含量均出现显著降低,降幅可达 7.04%~21.85%,施用生物炭可以显著提高菜地土壤 pH 值,有利于促进对土壤重金属 Cd 活性的钝化作用;而施用鸡粪却明显降低菜地土壤 pH 值,不利于菜地土壤重金属 Cd 的钝化作用。土壤 pH 值与油麦菜根部 Cd 累积量间呈显著的正相关性,但与油麦菜地上可食部位 Cd 累积量间的相关性并未达到显著性水平。该项研究可为生物炭与有机肥及氮磷钾复合肥复配修复污灌菜地土壤重金属镉污染提供一定的理论基础。

关键词:生物炭;鸡粪;复合肥;镉;土壤修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)06-0583-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0149

Combined Effects of Biochar and Fertilizer on Cadmium Contaminated Soil Remediation

WANG Qi-kai¹, GUO Wen-juan^{2,3}, SUN Guo-hong^{1*}, LIN Da-song^{2,3}, XU Ying-ming^{2,3}, LIU Jing-ru¹, YU Shi-lei¹

(1.College of Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2.Innovative Team of Heavy Metal Contaminated Farmland Remediation for Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3.Key Laboratory of Original Environmental Quality of Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The field experiment was employed to study on the combined effects of biochar and chicken manure and N, P and K compound chemical fertilizer on cadmium contaminated soil remediation, and the immobilization mechanism was elucidated through fractionation of cadmium in the tested soil. Results showed that the addition of these amendments could significantly reduce the edible Cd accumulation in *Lactuca sativa* L., decreased from 32.6% to 54.8% compared with the control. The application of these additives could also significantly decrease extractable Cd concentration by 7.04%~21.85%. Biochar could significantly improve soil pH value, promote the inactivation of Cd contaminated soil, while the application of chicken manure significantly decreased soil pH value, which showed the effect of activating Cd in soil. Soil pH value had significant positive correlation with root Cd concentration of tested cultivars, but did not reach the significant effect level with the shoot Cd concentration. The research can provide a theoretical basis for the application of biochar combined with chicken manure and N, P and K compound chemical fertilizer on remediation of sewage irrigated Cd contaminated soil.

Keywords: biochar; chicken manure; compound fertilizer; Cd; soil remediation

镉(Cd)不是人体必需的元素,但被认为是对人体健康毒性最大的重金属。国际癌研究局(IARC)早在 1993 年就已将 Cd 定为人类致癌物质,可引发人

类肾癌、膀胱癌,以及乳腺癌和前列腺癌。我国重金属污染特别是南方地区稻米 Cd 污染范围广、面积大,与大气污染和水污染治理相比,重金属 Cd 污染具有发生的隐蔽性、毒性的缓效性、恢复的长期性等特点,治理难度大。环境保护部和国土资源部发布《全国土壤污染状况调查公报》指出,全国土壤 Cd 点位超标率达到 7.0%,调查表明,我国菜地土壤 Cd 超标率高达 24.1%^[1],局部地区蔬菜重金属检出率为 100%^[2],Ryan 等^[3]研究发现,人体中超过 70% Cd 来源于蔬菜。

生物炭通常显碱性,且其具有较大的比表面积、

收稿日期:2015-06-17

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(201410061126);农业部产地环境质量重点实验室开放基金项目(2013-KFJJ-01);国家自然科学基金项目(21177068);中国农业科学院创新工程项目(2014-cxgc-xym)

作者简介:王期凯(1991—),男,山西人,学士,从事土壤重金属污染修复技术研究。E-mail: 1451199055@qq.com

* 通信作者:孙国红 E-mail: sgh1999@126.com

较强的吸附和抗分解能力,使其可以作为重金属污染土壤的修复剂^[4]。生物炭可以通过提高土壤 pH 值来降低重金属在土壤中的移动性,对重金属起到固定作用^[5]。生物炭表面的官能团同样可以增强土壤保持重金属离子的能力^[6],生物炭添加到土壤后老化过程产生的有机含氧官能团可以作为重金属 Cd 吸附位点,促进生物炭对 Cd 的吸附固定作用^[5]。大田实验发现黏土矿物和鸡粪配合施用能够显著降低普通油菜地上部 Cd 含量,最大降幅可达到 50.5%^[7]。此外,盆栽试验发现石灰配施猪粪可以显著降低土壤中的碳酸盐结合态 Cd、Pb 和 Zn 含量,抑制小白菜对土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的吸收累积^[8]。研究表明氮肥主要通过硝态、铵态氮的根际碱化和酸化效应来影响重金属的活性,磷肥主要通过磷酸根离子来影响土壤表面电荷,进而影响土壤对重金属的吸附,钾肥的效果主要表现为伴随阴离子氯离子的作用来降低土壤对 Cd 离子的吸附^[9]。在前期开展低累积油菜品种与钝化修复技术联合实验中,发现高剂量生物炭和鸡粪复配处理可显著降低油菜地上部 Cd 含量,最大降低率可达 72.0%,土壤 TCLP 提取态 Cd 含量最大降低率为 36.5%^[4]。但由于低累积油菜品种少,受到环境因素变化影响大,实际生产中推广困难大。因此,阻控常规油菜品种生产中重金属 Cd 污染仍然是土壤修复的主要目标。

本文选用棉花秸秆生物炭,通过大田实验,研究生物炭与有机肥及氮磷钾复合肥联合使用对菜地土壤重金属 Cd 污染钝化修复效应,以期为北方污灌菜地重金属 Cd 污染修复提供一定的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料性质

生物炭原料为棉花秸秆在缺氧条件下 550~600℃热解 6~8 h 制备而成。生物炭 C、H、N 和 O 元素的质量分数分别为 78.01%、2.46%、1.18%和 18.26%。使用前过 100 目筛(粒径小于 0.15 mm)。发酵鸡粪购自石家庄市希星肥业科技有限公司,其基本理化性质见表 1。氮磷钾复合肥有效含量 N:P₂O₅:K₂O 为 16:22:7,购自天津市津鸥化肥有限责任公司。

1.2 田间实验

本研究采用野外田间实验进行,田间实验点位于天津市某污灌区重金属镉污染菜地,该菜地为 22.5 m×58.6 m 约 1 319 m² 的长方形田块,常年种植蔬菜。土壤母质为湖沼相沉积物,土壤质地粘重,通体为粘性土。该点位于受镉、铅、汞、铜、锌等多种重金属元素

污染的天津北排河污灌区,农田长期使用污水进行灌溉,根据土壤环境质量国家标准(GB 15618—1995),该实验点菜地土壤重金属镉含量超过土壤环境质量二级标准。供试土壤的基本理化性质见表 2。

生物炭添加量参考前期大田试验结果^[4,7],氮磷钾复合肥料添加量参考文献[10]。实验共设置 10 种钝化修复方案:(1)CK(对照,不添加任何钝化材料);(2)B1(生物炭 5 t·hm⁻²);(3)B1+M(生物炭 5 t·hm⁻²+氮磷钾复合肥 0.6 t·hm⁻²);(4)B1+P(生物炭 5 t·hm⁻²+发酵鸡粪 10 t·hm⁻²);(5)B2(生物炭 10 t·hm⁻²);(6)B2+M(生物炭 10 t·hm⁻²+氮磷钾复合肥 0.6 t·hm⁻²);(7)B2+P(生物炭 10 t·hm⁻²+发酵鸡粪 10 t·hm⁻²);(8)B3(生物炭 20 t·hm⁻²);(9)B3+M(生物炭 20 t·hm⁻²+氮磷钾复合肥 0.6 t·hm⁻²);(10)B3+P(生物炭 20 t·hm⁻²+发酵鸡粪 10 t·hm⁻²)。

每组设置 4 个重复,总计 40 个小区,每个示范小区面积 10 m²,总示范面积 400 m²。为了消除试验系统误差,尽可能减少随机误差。将钝化材料施于土壤表层,再将钝化材料在耕作层翻耕土壤,使钝化材料与镉污染土壤充分混匀,田间水分保持 70%田间最大持水量的湿润状态,平衡一个月后即可种植蔬菜,田间水分管理与正常的农业生产相一致。

表 1 供试发酵鸡粪基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of fermented chicken manure

参数	量值
pH 值	6.19
有机质/%	64.51
全 N/g·kg ⁻¹	17.0
有效 P/mg·kg ⁻¹	6.3
速效 K/mg·kg ⁻¹	7.6
总 Cd/mg·kg ⁻¹	0.57
总 As/mg·kg ⁻¹	31.1
总 Cu/cm ³ ·kg ⁻¹	105.7
总 Zn/mg·kg ⁻¹	160.2

表 2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the tested soil

参数	量值
pH 值	7.38
有机质/%	6.21
CEC/cm ³ ·kg ⁻¹	15.7
总 Cd/mg·kg ⁻¹	2.76
有效 Cd/mg·kg ⁻¹	1.36

供试蔬菜:油麦菜(*Lactuca sativa* L.),品种为四季油麦菜。

1.3 样品分析

油麦菜生长 40 d 后收获,收获的蔬菜样品分为地上可食部和根部 2 部分,其中地上可食部称量鲜重。地上可食部和根部均先用自来水冲洗,再用去离子水洗净,然后置于烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,在 75 ℃ 下烘干至恒重,称量地上部干重。烘干后的植物样品放在干燥器中保存并尽快磨碎后收集装袋,用于 Cd 含量的测定。土壤 pH 值采用干湿分析方法测定^[4],土样全镉采用 HNO₃-HClO₄-HF 消化、原子吸收分光光度法测定。土壤中 Cd 有效态采用 DTPA 浸提剂提取测定^[10]。植物样品全镉采用 HNO₃-HClO₄ 消化、原子吸收分光光度法测定。

1.4 仪器设备

原子吸收分光光度计(SolaarM6,美国热电公司);电热数控烘箱(101-3A,天津泰斯特仪器设备有限公司);微型植物粉碎机(FZ102,天津泰斯特仪器设备有限公司);微型土壤粉碎机(FT102,天津泰斯特仪器设备有限公司);电热板(EH35B,北京莱伯泰科仪器设备有限公司)。

1.5 数据处理

应用 Origin 8.5 分析数据、作图,应用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较,检验不同处理间差异程度,进行相关数据的统计分析,文中提到的差异具有显著性均指 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 钝化修复对油麦菜地上部位 Cd 累积量的影响

不同钝化处理方式对 Cd 污染菜地土壤中油麦菜地上可食部位 Cd 累积量的影响见图 1。从图 1 中可以看出,与对照相比,各钝化处理显著降低了油麦菜地上可食部位的 Cd 累积量,降幅为 32.6%~54.8%,其中 B1+P、B2+P 和 B3+P 3 种处理对油麦菜可食部位 Cd 累积量降低幅度分别可达 48.4%、54.8% 和 46.7%。说明生物炭与发酵鸡粪、氮磷钾复合肥复配处理效果要明显好于生物炭单一处理,其中低、中和高剂量生物炭与发酵鸡粪复配的效果又要好于生物炭与氮磷钾复合肥复配处理。本研究中 B1+P 和 B2+P 处理可使油麦菜地上可食部位中 Cd 累积量降低到《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2005)规定的限定值 0.2 mg·kg⁻¹ 以下,满足油麦菜安全生产的需要。

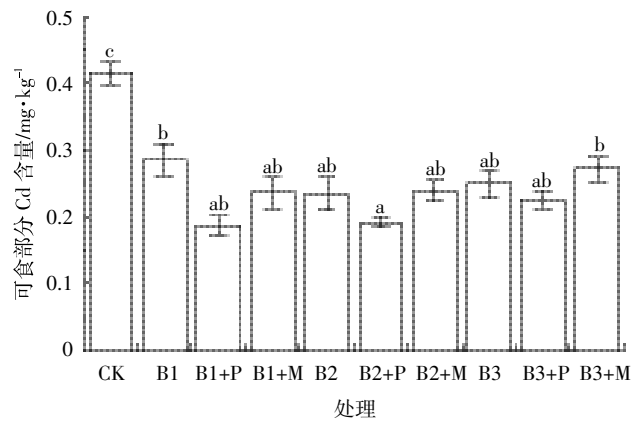


图 1 不同钝化处理对油麦菜可食部位 Cd 含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on the concentrations of Cd in the edible part of *Lactuca sativa* L.

2.2 钝化修复对油麦菜根部 Cd 累积量的影响

Cd 污染菜地土壤不同钝化处理方式下,油麦菜根部 Cd 累积量见图 2。从图 2 可以看出,施用各种钝化材料后,油麦菜根部 Cd 累积量较对照均出现显著降低,降幅达 14.4%~30.9%。其中低、中和高量生物炭与发酵鸡粪复配 3 种处理对油麦菜根部 Cd 累积量影响最大,与对照相比,B1+P、B2+P 和 B3+P 3 种处理分别降低油麦菜根部 Cd 累积量达 28.1%、24.4% 和 30.9%。

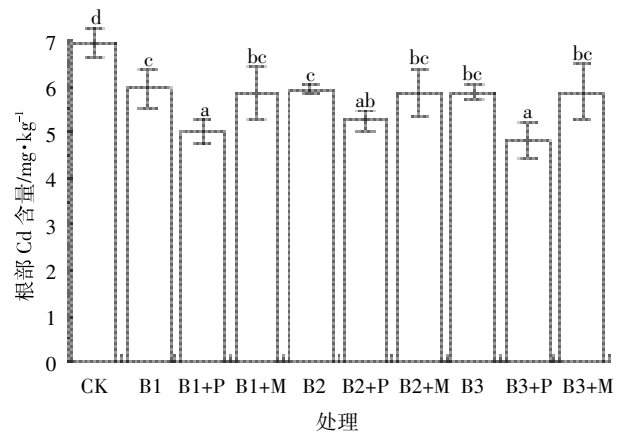


图 2 不同钝化处理对油麦菜根部 Cd 含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the concentrations of Cd in the root of *Lactuca sativa* L.

2.3 钝化修复对菜地土壤有效态 Cd 含量的影响

在土壤重金属污染中,大部分重金属被吸附固定在土壤颗粒中保持相对稳定,一般难以迁出土壤,但重金属可以通过土壤-植物系统被植物吸收,从而对人类健康造成危害。土壤中能够被植物体吸收的重金属仅仅是具有生物有效性的部分,因此,降低土壤重

金属活性是阻断土壤重金属向植物可食部位迁移的主要措施。本实验中不同钝化处理对菜地土壤有效态 Cd 含量的影响见图 3。从图 3 可以看出,与对照相比,各钝化处理后土壤有效态 Cd 含量均出现显著降低,降幅可以达到 7.04%~21.85%,其中 B1、B2 和 B1+M 处理效果最为明显,分别降低 21.8%、19.6%和 19.0%。说明单施一定剂量生物炭以及生物炭与发酵鸡粪、氮磷钾复合肥复配等钝化处理可以有效地降低镉污染菜地土壤中 Cd 的有效性,而且低、中用量的生物炭单施效果要明显好于高用量。

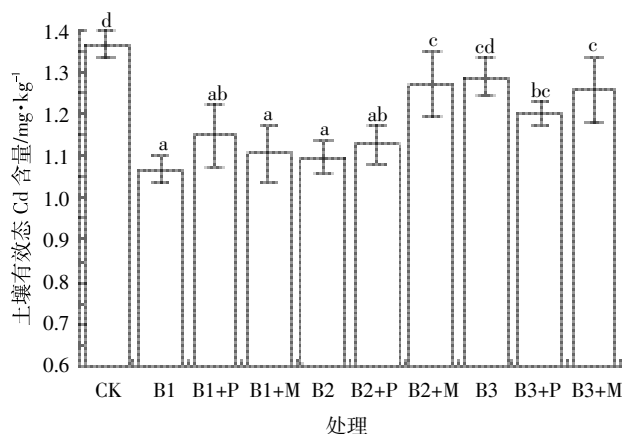


图 3 不同钝化处理对土壤有效态 Cd 含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the concentrations of DTPA-available Cd in the soil

2.4 钝化修复对 Cd 污染土壤 pH 值的影响

土壤的 pH 值是影响重金属吸附-解吸和沉淀-溶解平衡的主要因素之一,因此通过调控土壤 pH 值对降低土壤中重金属的有效性、迁移能力以及减缓重金属对植物的危害性等均具有重要的作用。由图 4 可见,不同钝化材料处理对土壤 pH 值存在不同的影响。与对照相比,B1+P、B2+P、B3+P 和 B1+M 4 种处理的土壤 pH 值均出现不同程度的降低,降幅为 0.04~0.14 个单位值,B1、B2 和 B3 3 种处理土壤 pH 值显著升高,pH 值最高可以增加 0.25 个单位值。说明施用

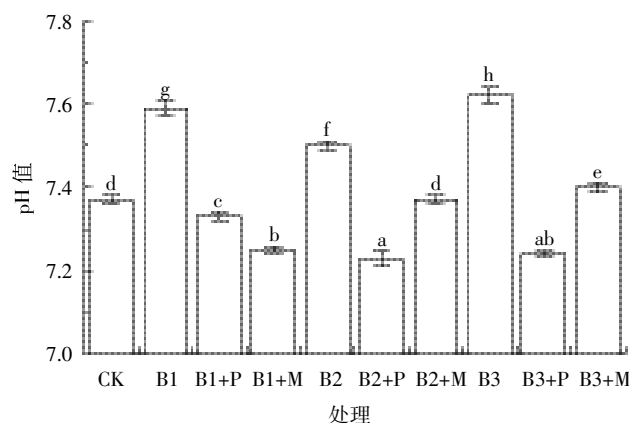


图 4 不同钝化处理对土壤 pH 值的影响

Figure 4 Effects of different treatments on soil pH

生物炭可以显著提高土壤 pH 值,有利于钝化土壤重金属 Cd 的活性;而施用鸡粪却明显降低土壤 pH 值,不利于菜地土壤重金属 Cd 的钝化作用。

2.5 土壤 pH 值和有效态 Cd 含量与油麦菜吸收累积 Cd 量相关性分析

从表 3 中可以看出,油麦菜地上可食部位 Cd 累积量与根部 Cd 累积量间的相关系数为 0.717,达到了极显著性水平。重金属 Cd 被油麦菜根系吸收,然后向地上部位转移,根系吸收的量多,则其向地上部位转移的部分则相应的增多,因此油麦菜地上可食部位 Cd 累积量与根部 Cd 累积量间存在显著相关关系,这也反映出不同的钝化材料处理虽然在抑制油麦菜根部对 Cd 吸收累积上具有不同的效果,但其可能在阻止 Cd 从根部向地上可食部位的转运方面并没有特别明显的差异。土壤的 pH 值与油麦菜根部 Cd 累积量间呈显著的正相关性,但与油麦菜地上可食部位的 Cd 累积量间的相关性并未达到显著性水平。油麦菜地上可食部位和根部 Cd 累积量均与土壤有效态 Cd 含量间存在显著的正相关性,相关系数分别为 0.419 和 0.336,其中油麦菜地上可食部位与土壤有效态 Cd 含量间的相关性达到了极显著水平。这也充分证明了

表 3 土壤 pH 值及有效态 Cd 含量与油麦菜吸收 Cd 量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of Cd uptake of *Lactuca sativa* L. with concentrations of available Cd in soil and soil pH

指标	油麦菜可食部位 Cd 累积量	油麦菜根部 Cd 累积量	土壤 pH 值	土壤有效态 Cd 含量
油麦菜地上部 Cd 含量	1			
油麦菜根部 Cd 含量	0.717**	1		
土壤 pH 值	0.212	0.362*	1	
土壤有效态 Cd 含量	0.419**	0.336*	0.045	1

注:“**”表示 $P<0.01$,“*”表示 $P<0.05$ 。

土壤有效态 Cd 是可以被植物直接吸收的形态,土壤有效态 Cd 含量对油麦菜地上可食部位积累 Cd 具有显著影响,通过降低土壤 Cd 的有效性,可以降低其向植物体内迁移累积的风险。

3 讨论

早在 1879 年,Herbert Smith 在论著 *Scribner's Monthly* 中就注意到当地烟草和甘蔗的富饶多产与富含生物炭的黑土密切相关^[1]。自从 20 世纪 40 年代研究证明,黑土壤是 2 500 年,甚至 6 000 年以前由生活在亚马逊流域的人们制造的。一般认为,他们使用的材料包括动物粪、鱼、动物骨头和植物废物。但是生产黑土壤最关键的原料,也是黑土壤之所以呈现黑色的原因,是木炭的使用,黑土壤中的木炭可以使土壤肥力维持一个世纪之久。生物炭的多孔结构和表面丰富的含氧官能团使得生物炭具有较强的吸附重金属离子的能力,在前期研究中科学家开展了较多生物炭对水体中重金属的吸附研究工作。

本文研究结果显示,与对照相比,生物炭单施以及生物炭与发酵鸡粪、氮磷钾复合肥复配作为钝化材料施入后,油麦菜可食部位的 Cd 累积量均显著降低,土壤有效态 Cd 含量也均显著下降,表明生物炭单施及其与氮磷钾复合肥、发酵鸡粪复配使用对于土壤 Cd 污染的钝化修复作用具有明显效果。生物炭具有多孔性、高比表面积和较强表面吸附能力,其表面通常为高度芳香化结构和部分羟基、酚羟基和羰基等官能团,这种结构特点不仅决定了它比其来源的母体碳具有更高的化学和生物学稳定性,可以在土壤中稳定存在上千年^[12],而且对有机和无机污染物具有高度的亲和性,因此能较强烈地吸附并影响土壤中重金属的迁移性和降低重金属生物可利用性。Fellet 等^[13]的研究发现,生物炭可以提高尾矿的 pH 值,降低尾矿中重金属的含量,证明生物炭可以用在使矿山废弃物中的重金属实现植物稳定化的过程中。重金属淋滤实验同样发现^[14],肉鸡垃圾生产的生物炭能够较好地降低滤液中的 Cu 含量,而山核桃壳制备的活性炭对降低滤液中 Cd 和 Ni 含量效果更好。Beesley 等^[15]研究发现生物炭对土壤中 Cd 和 Zn 具有良好的吸附固定作用,添加生物炭的土壤淋滤液中 Cd 和 Zn 浓度与对照相比降低 45~300 倍,尤其对 Cd 效果更明显;而在 Cd 和 Zn 污染的土壤中加入由硬木树制备的生物炭,进行 60 d 的田间培养实验后,土壤孔隙水中 Cd、Zn 浓度明显降低^[16]。这些实验结果均表明土壤添加生物

炭可以明显降低重金属的生物有效性。

生物炭一般呈碱性,可以一定程度地提高土壤的 pH 值,而发酵鸡粪在腐熟过程中会形成和累积大量的有机酸从而降低土壤的 pH 值^[17],氮磷钾复合肥的使用同样可以使土壤的 pH 值降低^[18]。本文研究同样可以发现生物炭单施可显著提高 Cd 污染土壤的 pH 值,当生物炭与发酵鸡粪复配后,土壤的 pH 值显著低于对照处理,中、高量生物炭与氮磷钾复合肥混合后土壤的 pH 值比对照略高,这可能是由于发酵鸡粪对于土壤 pH 值的降低能力较强,中和了生物炭的部分碱性作用。土壤 pH 值升高会增强土壤有机/无机胶体及土壤黏粒对重金属离子的吸附能力,使土壤中重金属离子有效性降低,减少可交换态重金属离子浓度。因此,土壤 pH 值是影响土壤中 Cd 生物有效性的一个重要因素,但本文研究中两者之间并没有显著的相关性,原因可能是在生物炭钝化修复土壤中 Cd 的过程中,生物炭对土壤重金属 Cd 的钝化机制包括提高土壤 pH 值和对重金属 Cd 吸附作用 2 个方面,而相对提高土壤 pH 值,生物炭对 Cd 的吸附起到了重要的作用。

本文研究中发现,虽然低、中、高用量生物炭单施对土壤 pH 值提高的效果最显著,但油麦菜地上可食部位 Cd 含量在 3 种用量生物炭与发酵鸡粪复配处理时降低效果最显著。畜禽粪便等有机肥中含有大量的腐植酸,其中包含各种羧基和羟基官能团,向 Cd 污染土壤中施加鸡粪等有机肥,可与土壤溶液中有效态 Cd 离子发生专性吸附、离子交换、金属配合物以及共沉淀等作用,与其结合形成重金属有机复合物和螯合物,导致 Cd 的形态发生改变,土壤中可溶态和可提取态 Cd 等生物可利用态向活性低的生物不可利用形态转化,从而降低 Cd 的生物有效性和可迁移性,阻控土壤中的 Cd 向农作物可食部分运移富集,降低重金属对环境的危害^[19-20]。另外也可能是由于鸡粪的施用,导致土壤中磷及磷酸盐含量大量增加^[21],磷酸盐可以通过磷和 Cd 作为离子对相互吸附、磷复合物和 Cd 的表面络合以及形成 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Cd}(\text{PO}_4)_2$ 沉淀等固定 Cd,这也可能是油麦菜地上可食部分积累 Cd 量降低的一个原因。氮磷钾复合肥中也含有一定的磷和磷酸盐,大量研究已经证明磷肥能够显著降低植株中 Cd 的含量^[22],但在本文实验条件下,生物炭与氮磷钾复配后并没有明显的规律显示其较生物炭单施具有对土壤 Cd 污染更好的钝化效果。氮、磷、钾肥对土壤中 Cd 的生物有效性影响较为复杂,不同的

肥料品种,以及肥料中的成分等都会影响土壤中 Cd 的存在形态及植物对 Cd 的吸收和积累。

总体来看,生物炭与发酵鸡粪复配施用于 Cd 污染土壤中,虽然使土壤的 pH 值有一定程度的降低,但在减少油麦菜地上可食部位 Cd 的积累以及降低土壤中 Cd 有效性方面仍然好于钝化剂单一处理。值得注意的是,随着时间的推移,由于发酵鸡粪与土壤矿物组分的交互作用以及腐植酸降解等因素的影响,土壤中 Cd 可能会从有机、无机结合物中重新释放出来,导致土壤中 Cd 的有效性发生改变^[23]。因此,需要加强对生物炭与发酵鸡粪复配钝化修复农田土壤重金属 Cd 的长期稳定性进行监控,以便及时增施钝化剂或采取农艺措施进行调控,提高对土壤重金属 Cd 的钝化修复稳定性效果,保障农产品可持续安全生产。

4 结论

(1)在降低油麦菜地上部位 Cd 累积量效果方面,生物炭与发酵鸡粪、生物炭与氮磷钾复合肥复配处理要明显好于生物炭单一处理,其中低、中和高剂量生物炭与发酵鸡粪复配的效果要好于生物炭与氮磷钾复合肥复配处理。

(2)油麦菜根部 Cd 累积量随着钝化材料施用较对照均出现显著降低,其中低、中和高量生物炭与发酵鸡粪复配 3 种处理对油麦菜根部镉累积量降低效果最为显著。

(3)单施一定剂量生物炭以及生物炭与发酵鸡粪、生物炭与氮磷钾复合肥复配材料可以有效地降低镉污染菜地土壤中 Cd 的有效性。

(4)施用生物炭可以显著提高土壤 pH 值,有利于降低土壤重金属 Cd 的活性;而单施鸡粪可明显降低土壤 pH 值,不利于菜地土壤重金属 Cd 的钝化作用。

参考文献:

- [1] Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(9): 1115–1126.
- [2] 师荣光, 赵玉杰, 高怀友, 等. 天津市郊蔬菜重金属污染评价与特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005(增刊): 169–173.
SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie, GAO Huai-you, et al. Metals influencing the level of heavy metal contamination of vegetables in Tianjin City as derived by principal components analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(suppl): 169–173.(in Chinese)
- [3] Ryan J A, Pahren H R, Lucas J B, et al. Controlling cadmium in the human food chain: A review and rationale based on health effects[J]. *Environ Res*, 1982, 28: 251–302.
- [4] 王 林, 徐应明, 梁学峰, 等. 生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(11): 2851–2858.
WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Effects of biochar and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars with low cadmium accumulation[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11): 2851–2858.(in Chinese)
- [5] 钱林波. 生物炭对酸性土壤中有害金属植物毒性缓解及阻控机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
QIAN Lin-bo. The phytotoxicity alleviation and adsorption mechanism of toxic metals of acidic soil by biochar amendment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(in Chinese)
- [6] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83: 1262–1297.
- [7] 王 林, 秦 旭, 徐应明, 等. 污灌区镉污染菜地的植物阻隔和钝化修复研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2111–2117.
WANG Lin, QIN Xu, XU Ying-ming, et al. Phytoexclusion and in-situ immobilization of cadmium in vegetable field in sewage irrigation region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2111–2117.(in Chinese)
- [8] 杜彩艳, 祖艳群, 李 元, 等. 石灰配施猪粪对 Cd、Pb 和 Zn 污染土壤中重金属形态和植物有效性的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2008, 26(2): 170–174.
DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Effects of lime with pig manure on fractions of Cd, Pb and Zn in soil and phytoavailability[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2008, 26(2): 170–174.(in Chinese)
- [9] 徐明岗, 刘 平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 328–333.
XU Ming-gang, LIU Ping, SONG Zheng-guo, et al. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 328–333.(in Chinese)
- [10] 曾 宇, 雷雅丽, 李 京, 等. 氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 146–153.
ZENG Yu, LEI Ya-li, LI Jing, et al. Effects of application amounts of nitrogen, phosphate and potassium and planting density on yield and quality of rapeseed[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 146–153.(in Chinese)
- [11] Emma M. Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442: 624–626.
- [12] Pessenda L C R, Gouveia S E M, Aravena R. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with ¹⁴C ages of fossil charcoal[J]. *Radiocarbon*, 2001, 43: 595–601.
- [13] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9): 1262–1267.
- [14] Uchimiya M, Lima I M, Klasson T, et al. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter[J]. *Chemosphere*, 2010, 80: 935–940.
- [15] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 474–480.
- [16] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar

- 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: 2282–2287.
- [17] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 268–275.
- WANG Lin-quan, ZHOU Chun-ju, WANG Jun-ru, et al. Organic acids in chicken feces and their effects on availability of nutrients in loess soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 268–275. (in Chinese)
- [18] 赵 晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010(5): 953–961.
- ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010(5): 953–961. (in Chinese)
- [19] Wu F L, Lin D Y, Su D C. The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 2(10): 267–274.
- [20] 张亚丽, 沈其荣, 姜 洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001(2): 212–218.
- ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, JIANG Yang. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-pollution soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001(2): 212–218. (in Chinese)
- [21] 杨苞梅, 宋玉萍, 卢维盛, 等. 施用鸡粪后土壤磷的累积特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 421–425.
- YANG Bao-mei, SONG Yu-ping, LU Wei-sheng, et al. Accumulation of phosphorus in soils in chicken manure amended soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2): 421–425. (in Chinese)
- [22] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1585–1590.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585–1590. (in Chinese)
- [23] Chen H, Huang Q, Liu L, et al. Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: Influence on growth of pakchoi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 63–70.