

王 风, 王梦露, 许 堃, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 907-914.

WANG Feng, WANG Meng-lu, XU Kun, et al. Effects of biochar application on cadmium transformation in brown soil and uptake by baby bokchoi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 907-914.

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*

(沈阳农业大学土地与环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 农业部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

摘 要:以受镉(Cd)单一污染的棕壤为供试土壤,分别添加不同用量(0、1%、3%和5%)的稻壳生物炭进行土壤培养试验,通过测定不同形态重金属Cd含量及土壤pH的变化,研究生物炭施用对棕壤中Cd赋存形态的影响;将培养后的土壤继续进行盆栽油菜的种植,测定不同时期油菜地上部及地下部的Cd含量,并计算其根富集系数及地上部转运系数,旨在探明生物炭的施用对油菜吸收Cd的影响。结果表明,随生物炭施用量的增加,活性较强的交换态Cd的含量显著降低,而活性较弱的有机结合态和残渣态Cd的含量显著增加($P<0.05$);3%、5%的生物炭施用量提高了土壤pH,可交换态Cd与土壤pH存在极显著负相关关系($P<0.01$),有机结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态Cd与土壤pH存在显著正相关关系($P<0.05$)。与对照相比,不同生物炭施用量(1%、3%和5%)处理的油菜地上部Cd含量分别降低了18.86%、64.22%、68.40%,地下部Cd含量分别降低了11.03%、57.93%、60.62%;油菜全生育期根富集系数减小值在0.01~1.26范围内,地上部转运系数减小值在0.22~0.32范围内,其中以生物炭施加量为5%的处理效果最佳。

关键词:生物炭;Cd;赋存形态;富集系数;转运系数

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)05-0907-08 doi:10.11654/jaes.2016-1599

Effects of biochar application on cadmium transformation in brown soil and uptake by baby bokchoi

WANG Feng, WANG Meng-lu, XU Kun, DONG Xu, YU Na, ZHANG Yu-long, DANG Xiu-li*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Northeast Key Laboratory of Conservation and Improvement of Cultivated Land, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China)

Abstract: An incubation experiment was conducted to investigate the effects of biochar derived from rice husk on cadmium (Cd) transformation in brown soil. Biochar was applied at four rates (0, 1%, 3%, and 5% *m/m*) to the soil. The effect of biochar application on Cd uptake by baby bokchoi was studied by measuring the Cd contents underground and aboveground of baby bokchoi plants every 10 days in a pot experiment. The bioaccumulation factor of Cd underground and the translocation factor of Cd from underground to aboveground were also calculated. Results showed that the contents of the exchangeable fraction of Cd significantly decreased and the organically bound fraction of Cd significantly increased, with the increase of biochar application ($P<0.05$). Compared with no biochar addition, 3% and 5% biochar application increased the soil pH. There was negative correlation between soil pH and the exchangeable form of Cd ($P<0.01$). There was positive correlation between soil pH and the organically bound form of Cd, the Fe and Mn oxide bound forms of Cd, and the residual form of Cd ($P<$

收稿日期:2016-12-13

作者简介:王 风(1990—),女,硕士研究生,主要从事土壤重金属的生态修复研究。E-mail:ailang25@163.com

*通信作者:党秀丽 E-mail:dangxiuli@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41301530);农业部环境保护科研监测所开放基金项目;农业部东北耕地保育重点实验室开放基金

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41301530); The Key Laboratory of Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture; The Key Laboratory of Northeast Conservation and Improvement of Cultivated Land, Ministry of Agriculture

0.05)。The Cd contents aboveground of the baby bokchoi plants for the 1%, 3%, and 5% biochar application decreased 8.86%, 64.22%, and 68.40%, respectively, compared with no biochar addition, and the Cd contents underground decreased 11.0%, 57.9%, and 60.6%, respectively. The Cd bioaccumulation factor underground decreased 0.01~1.26 and the Cd translocation factor from underground to aboveground decreased 0.22~0.32. Thus, 5% biochar application should be considered a suitable soil amendment for Cd.

Keywords: biochar; Cd; transformation; bioaccumulation factor; translocation factor

随着工业化、城镇化的持续推进,农田重金属累积和超标等环境问题日益突出,重金属污染问题已受到社会各界的广泛关注,特别是2013年湖南等地的“镉大米”事件发生以来,对重金属问题的重视更是提到了前所未有的高度。环保部2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》结果显示,与“七五”时期相比,土壤中重金属的含量在全国范围内普遍增加,其中镉(Cd)污染点位超标率达7.0%^[1-2],给粮食安全和人体健康带来巨大风险。我国农田土壤重金属污染在某些典型区域的表现程度已经不适宜耕作,但从全国范围来看,中度污染和轻度污染面积所占的比例较大。对于不能被弃耕或者改变农作物种植属性的耕地,如何做到“边利用、边修复”,通过调控土壤重金属的赋存形态进而阻控其由土壤向植物体迁移,已经成为土壤学、环境学研究的热点。

生物炭是生物质在厌氧或缺氧条件下,经高温热解产生的一种固态物质^[3],由于具有孔隙结构发达、比表面积大、阳离子交换量高等特性^[4-5],其作为一种新的土壤原位钝化修复剂引起了诸多研究者的关注^[6-8]。生物炭的施用效果与炭的来源和土壤性质有关。蒋田雨等^[9]将生物炭添加到红壤中发现,生物炭的添加可以中和土壤酸度,提高土壤pH,并增强土壤吸附和固定Pb的能力。李建宏等^[10]的研究表明,椰纤维生物炭添加到砖红壤中有长期吸附固定重金属Pb的作用,同时可降低重金属的移动性和生物有效性。

棕壤是东北地区典型的地带性土壤,由于受老工

业基地“三废”排放影响,重金属Cd污染较为严重,而有关生物炭修复棕壤重金属污染的研究报道并不多。本研究选用水稻稻壳为原材料制备生物炭,以受重金属Cd污染的棕壤为研究对象,研究不同生物炭施用量条件下棕壤中重金属Cd赋存形态的变化,并分析Cd赋存形态与pH之间的关系,在此基础上探讨生物炭对Cd在油菜体内转运的影响,为生物炭修复重金属Cd污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自沈阳农业大学后山科研基地旱地0~20 cm表层棕壤,基本理化性质如表1所示。

生物炭由水稻稻壳在缺氧条件下,经500℃高温裂解制备而成。供试生物炭过孔径为0.15 mm的尼龙筛后保存备用。生物炭基本理化性质如表2所示。

供试作物为油菜,品种为青县钰禾蔬菜育种中心研发的绿秀杂交油菜F₁。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤培养试验

向试验土壤中加入一定量的Cd(NO₃)₂·4H₂O,使Cd²⁺浓度达到5 mg·kg⁻¹,形成以Cd为单一污染源的污染土壤。调节污染后的土壤含水量,使其保持在田间持水量的60%,室温下稳定两周后将生物炭以0(CK)、1%(BC-1)、3%(BC-3)、5%(BC-5)的施加量(质量比)与Cd污染土样混合,每个处理3次重复。

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

Cd 背景值 Background Cd/mg·kg ⁻¹	pH	有机质 OM/ g·kg ⁻¹	阳离子交换量 CEC/cmole·kg ⁻¹	机械组成 Texture/%		
				0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm
0.12	5.91	12.02	12.7	42.0	28.0	30.0

表2 生物炭的基本理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the biochar

Cd 背景值 Background Cd/mg·kg ⁻¹	pH	pH _m	灰分 Ash/%	阳离子交换量 CEC/cmole·kg ⁻¹	C/%	N/%	C/N
0.01	9.76	8.10	61.13	19.54	26.33	0.378	69.66

在室温条件下进行培养,调节土壤含水量使其保持在田间持水量的60%,每隔1 d用去离子水给土壤补充水分,培养30 d后进行土壤样品的采集。

1.2.2 盆栽试验

将上述培养30 d后的土壤以每盆2.276 kg的用量装入聚乙烯材料盆中(按照土壤容重 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 计),并基施一定量的底肥(尿素 $1.064 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,二铵 $0.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硫酸钾 $0.8174 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),每个处理3次重复,调节土壤含水量使其保持在田间持水量的60%,每隔1 d用去离子水给土壤补充水分。土壤稳定一周后进行播种,每盆播种10粒,出苗后每盆保留5株生长一致的幼苗。利用称重法控制油菜生长过程中土壤的含水量,并保持其他生长条件一致。每隔10 d采集油菜地上部及地下部样品,共采集5次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤培养试验

培养30 d后的土样自然风干,分别过孔径为0.83 mm和0.15 mm的尼龙筛,保存备用。土壤全镉采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系消化;镉赋存形态采用 Tessier 五步连续提取法^[1]浸提,利用 CCD Simultaneous ICP-OES 测定 Cd 全量及各形态的 Cd 含量,其中残渣态含量通过差减法求得。土壤 pH 值采用 EUTECH pH510 测定,水:土比为2.5:1。

1.3.2 盆栽试验

在油菜生长的第10、20、30、40、50 d采集油菜样品,用自来水和去离子水洗净,将地上部和地下部分别装入纸质信封并编号,置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内杀青30 min,再调节温度至 $65 \text{ }^\circ\text{C}$,烘至恒重。将烘干后的植物样品粉碎保存备用。植株地上部和地下部全 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系消化、利用 CCD Simultaneous ICP-OES 测定。

1.4 数据处理及分析

采用 Excel 2013 软件和 Origin 8.5 软件进行数据处理与图表的绘制,利用 SPSS 19.0 进行显著性分析(Duncan)及 Pearson 相关性分析。

根富集系数=植物根内的重金属含量/土壤中重金属含量

地上部转运系数=地上部重金属含量/地下部重金属含量^[12]。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对棕壤重金属 Cd 赋存形态的影响

生物炭施用量对土壤重金属 Cd 赋存形态的影

响如图1所示。与对照相比,向土壤中添加不同用量的生物炭时,土壤中交换态 Cd 和铁锰氧化物结合态 Cd 含量随施用量的增加而逐渐降低,碳酸盐结合态 Cd 含量则显著增加($P<0.05$),但是不同生物炭施用量对碳酸盐结合态 Cd 含量的影响差异并不显著,有机结合态 Cd 和残渣态 Cd 含量随生物炭施用量的增加而增加。与未施用生物炭的处理相比,添加1%、3%、5%生物炭处理的交换态 Cd 含量分别降低了12.00%、27.81%和35.35%,碳酸盐结合态 Cd 含量分别增加了1.86%、1.74%和1.41%,铁锰氧化物结合态 Cd 含量分别降低了1.76%、4.91%和5.25%,有机结合态 Cd 含量分别增加了28.38%、44.86%和80.32%,残渣态 Cd 含量分别增加了1.24倍、3.08倍和3.80倍。由此可知,生物炭的添加能够促进土壤 Cd 由活性较强的交换态向稳定的有机结合态和残渣态转化,而且这种促进作用随生物炭施用量的增加而增加。

2.2 生物炭施用对棕壤 pH 的影响

生物炭施用对棕壤 pH 的影响如图2所示。添加1%、3%、5%生物炭处理的土壤 pH 分别为5.92、6.09和6.16,与未添加生物炭的处理相比,pH 值分别增加了0.01、0.18、0.25个单位,且1%的生物炭添加量未使土壤 pH 的变化达到显著水平($P>0.05$),而3%、5%的生物炭施用量可以使土壤 pH 显著提高。

2.3 棕壤重金属 Cd 赋存形态与 pH 的相关性

土壤中重金属 Cd 的某种赋存形态与土壤 pH 之

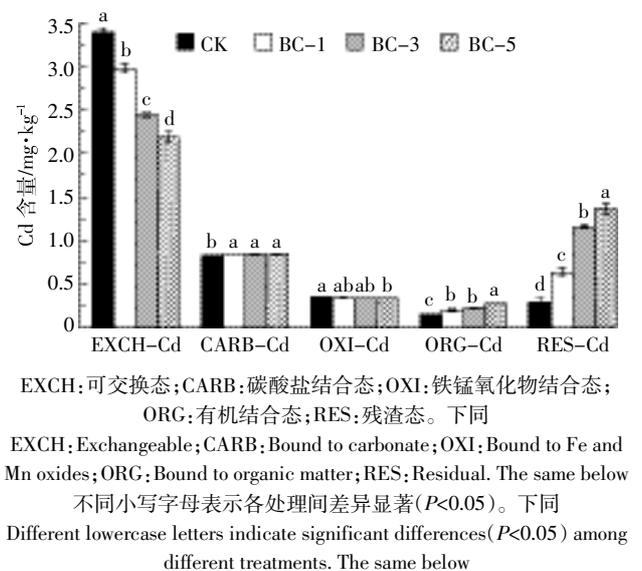


图1 生物炭施用对棕壤重金属 Cd 赋存形态的影响

Figure 1 Effects of biochar application on soil Cd fractions

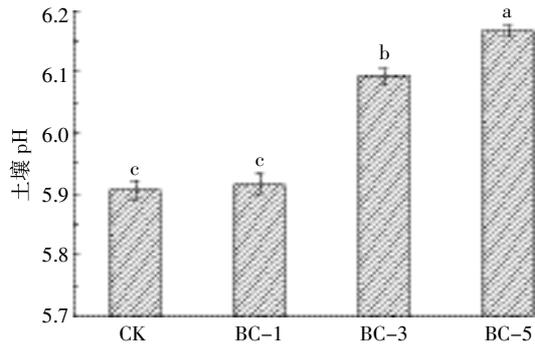


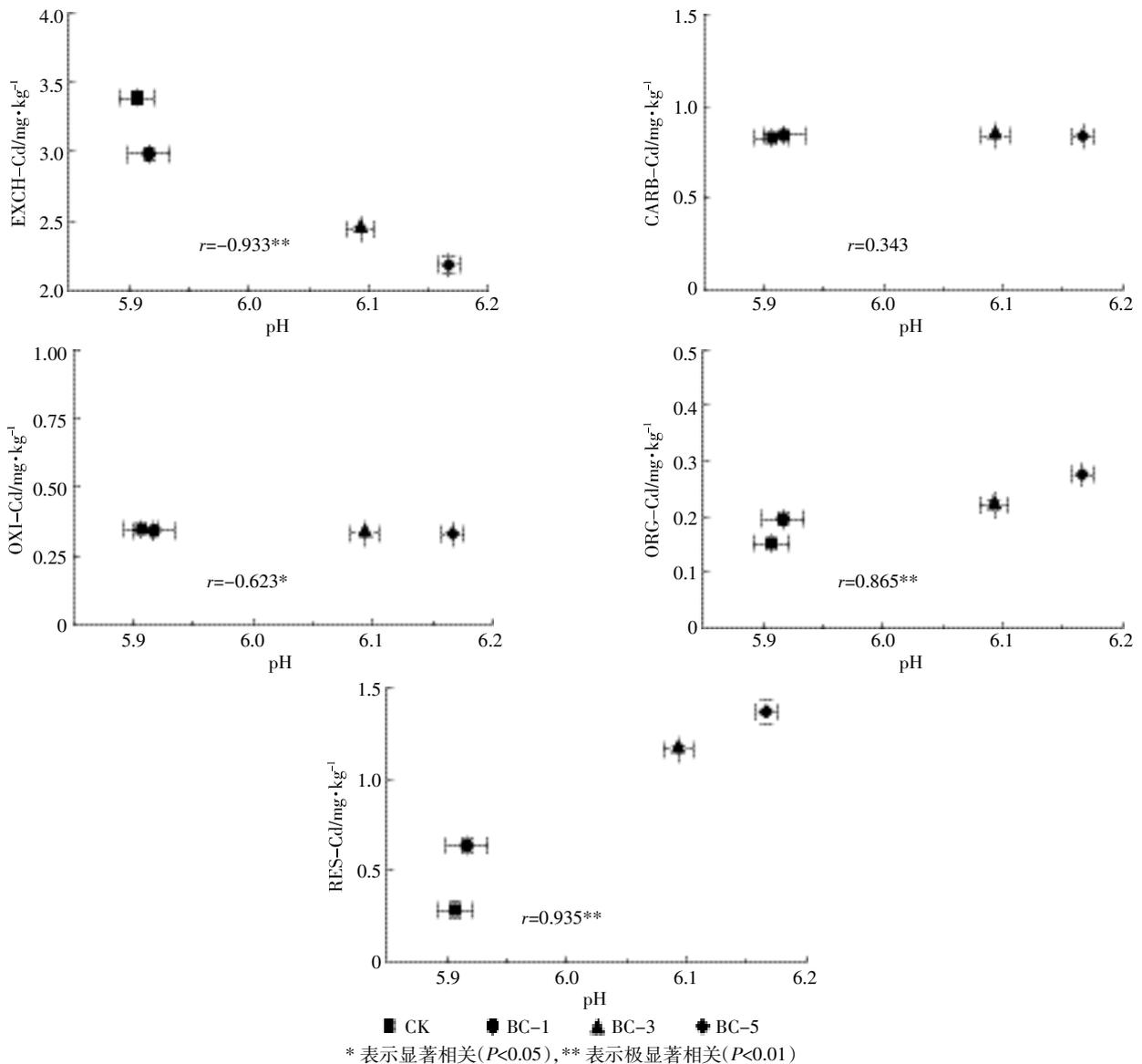
图2 生物炭施用对棕壤 pH 的影响

Figure 2 Effects of biochar application on brown soil pH

间存在一定的相关关系。由图3可知,土壤中可交换态Cd含量与土壤pH呈极显著负相关关系($P < 0.01$),有机结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态Cd与土壤pH存在显著正相关关系($P < 0.05$),而碳酸盐结合态Cd含量与土壤pH无显著相关关系。

2.4 生物炭施用对油菜地上部、地下部Cd含量的影响

如图4所示,油菜地上部和地下部的Cd含量随生物炭施用量的不同而产生显著性差异,整体表现为Cd含量随生物炭施用量的增加而减少,且生长后期Cd的减量更显著。在油菜生长的前期,植物的根系处于发育不完整时期,从土壤中吸收的各类物质都比较



*Indicates significant correlation between Cd fractions and pH in brown soil ($P < 0.05$). ** Indicates extremely significant correlation between Cd fractions and pH in brown soil ($P < 0.01$)

图3 棕壤重金属Cd赋存形态与pH的相关性

Figure 3 Correlation between Cd fractions and pH in brown soil

少,因而油菜地上部及地下部的Cd含量也较少,生长第10d时,1%、3%、5%处理的油菜地上部Cd含量分别为0.95、0.85、0.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与对照相比,分别降低了8.69%、18.60%、18.60%,地下部与对照相比分别降低了0.43%、4.62%、3.13%。随着时间的推移,油菜植株逐渐发育,从土壤中吸收的Cd量逐渐增加,但施用生物炭处理植株Cd含量始终低于对照。生长第20d时,1%、3%、5%处理的油菜地上部及地下部Cd含量与对照相比明显下降,地上部分别降低了14.23%、43.29%、60.59%,地下部分别降低了11.55%、35.35%、50.52%。直到成熟期,油菜植株发育完整,1%、3%、5%处理的油菜地上部和地下部Cd含量仍

低于对照,第50d时,地上部Cd含量下降百分比分别为18.86%、64.22%、68.40%,地下部下降百分比分别为11.03%、57.93%、60.62%。

通过对油菜根富集系数和地上部转运系数(表3、表4)的分析可知,同一时期油菜的根富集系数和地上部转运系数随生物炭施用量的增加均呈现减小的趋势,其中根富集系数减幅在0.01~1.26范围内,地上部转运系数减幅在0.22~0.32范围内。

3 讨论

本文通过土壤培养试验发现,生物炭的添加使土壤重金属Cd由交换态向铁锰氧化物结合态、有机结

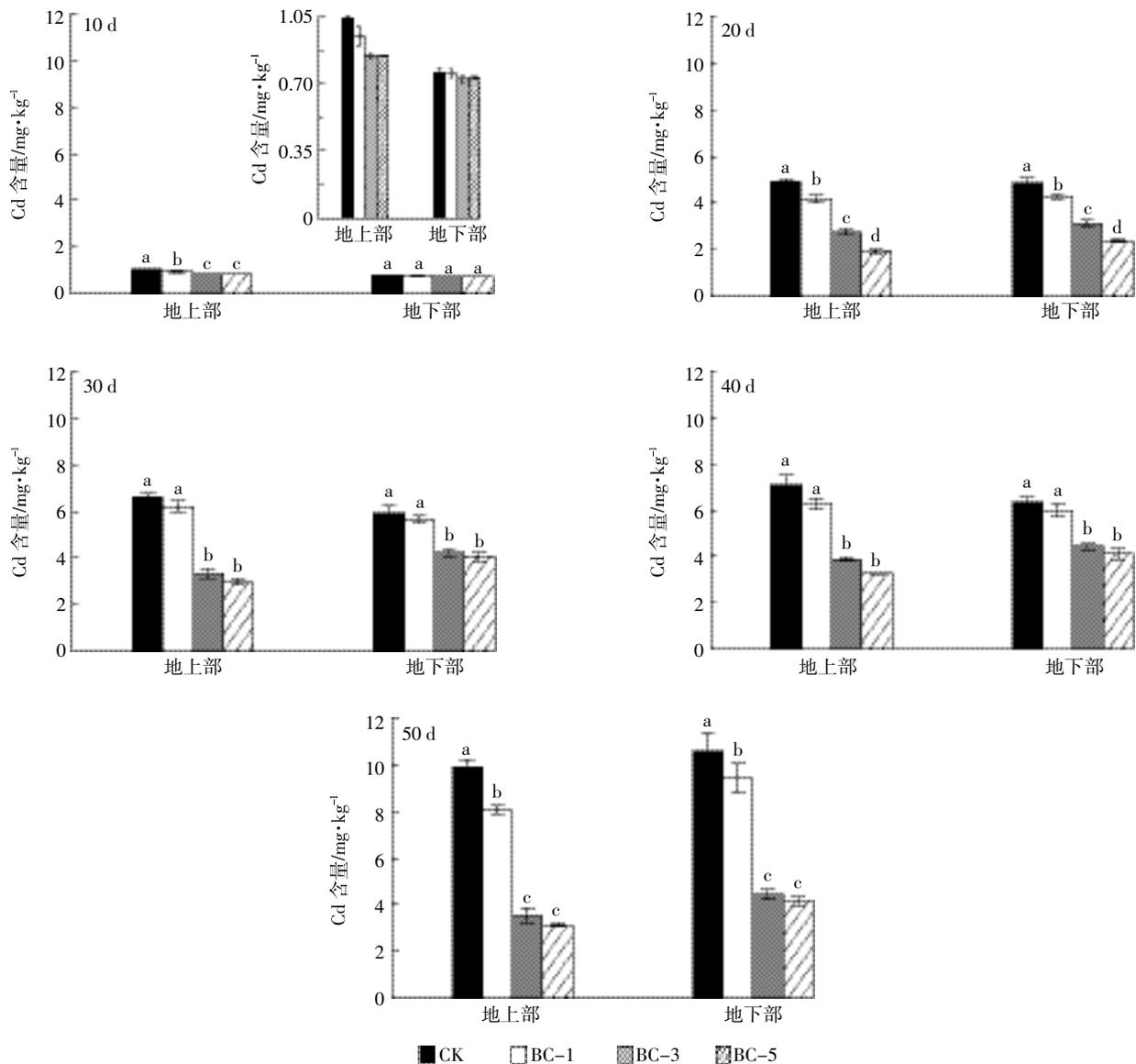


图4 生物炭施用对油菜地上部、地下部Cd含量的影响

Figure 4 Effects of biochar application on Cd contents in underground and aboveground of baby Bokchoi

合态和残渣态转化,从而降低重金属 Cd 的生物有效性,且不同生物炭施用量对土壤重金属 Cd 赋存形态的影响差异显著(图 1)。曹莹等^[13]的研究结果与本试验相似,即生物炭的施用可以促使水溶态镉向其他各形态镉转化,从而降低镉的有效性。Houben 等^[14]的研究表明,生物炭在砂质壤土中的施用可以通过直接吸附作用,或对土壤组分和性质的间接改变,来影响重金属在土壤中的赋存形态,进而影响重金属在土壤中的迁移及生物有效性。本研究发现,添加生物炭的三个处理之间碳酸盐结合态 Cd、铁锰氧化物结合态 Cd 含量变化不显著($P<0.05$),可能是由于生物炭与土壤的培养时间较短,土壤中碳酸盐与铁锰氧化物在短期内相对较为稳定^[15]。进入土壤中的重金属通过溶解、沉淀、凝聚、络合吸附等反应,在土壤中形成不同的赋存形态,其中 pH 值是决定土壤重金属赋存形态的关键因素^[16]。Méndez 等^[17]研究结果表明,生物炭的添加使黏土土壤 pH 增加的同时改变了重金属的赋存形态,且能够有效削减土壤重金属在植株中的累积能力及迁移能力。本文通过分析土壤重金属 Cd 赋存形态与土壤 pH 的相关性发现,交换态 Cd 和铁锰氧化物结合态 Cd 含量与土壤 pH 存在显著负相关关系,有机结合态 Cd 和残渣态 Cd 含量与土壤 pH 存在显著正相关关系(图 3)。本研究发现,较高用量的生物炭提高了土壤 pH(图 2),可能是由于生物炭表面存在能与 H⁺结合的有机酸根-COO⁻和-O⁻基团,另外,生物

炭中含有一定的灰分,施加到土壤中后会中和土壤的酸度,从而使土壤 pH 提高^[18-20]。本研究使用的稻壳生物炭的灰分含量较高,对土壤 pH 的提高有一定的作用。土壤 pH 的提高会增加土壤胶体上的负电荷,促进土壤对 Cd 的吸附,同时也会促进 CdCO₃ 和 Cd(OH)₂ 沉淀的生成,使污染土壤中的 Cd 由活性较高的可交换态向活性较低的形态转化^[21-22],以达到固定土壤中重金属 Cd 的目的。

根系是植物吸收养分及各种元素的重要器官,也是有毒物质进入植株的最后一道屏障,重金属 Cd 主要在蔬菜的根部富集^[23],因此植物对重金属的积累能力取决于根系对重金属的吸收能力^[24]。土壤中不同形态的重金属对植物具有不同的生物有效性和毒性:可交换态和碳酸盐结合态是植物可以直接吸收的形态;铁锰氧化物结合态重金属由于专性吸附或共沉淀存在于土壤中,成为植物的潜在可利用形态,一般情况下不易被植物吸收利用;有机结合态和残渣态属于植物的难利用态;残渣态与土壤结合最牢固,生物活性最低^[25]。本试验通过分析油菜各生长期、各部位 Cd 的积累量发现,各个时期植株地上部和地下部的 Cd 积累量随生物炭施用量的增加而降低,与毛懿德等^[26]、Park 等^[27]、王艳红等^[28]研究结果一致。这说明添加生物炭在一定程度上能够通过改变土壤中 Cd 的赋存形态,尤其是土壤中可交换态 Cd、残渣态 Cd 的比例及作物根系中 Cd 的含量,从而阻控 Cd 在土壤-

表 3 生物炭施用对油菜根富集系数的影响

Table 3 Effects of biochar application on root bioaccumulation factors of baby Bokchoi

处理	根富集系数				
	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	0.15±0.008a	0.95±0.065a	1.16±0.088a	1.24±0.059a	2.07±0.232a
BC-1	0.15±0.007a	0.84±0.031b	1.11±0.040a	1.17±0.080a	1.84±0.172b
BC-3	0.14±0.005a	0.61±0.037c	0.83±0.045b	0.87±0.037b	0.87±0.059c
BC-5	0.14±0.002a	0.47±0.025d	0.79±0.048b	0.81±0.064b	0.81±0.051c

注: 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different letter indicates significant differences among treatments($P<0.05$) in the same row. The same below.

表 4 生物炭对油菜地上部转运系数的影响

Table 4 Effects of biochar application on translocation factors of baby Bokchoi

处理	地上部转运系数				
	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
CK	1.37±0.052a	1.00±0.044a	1.11±0.038a	1.11±0.041a	0.94±0.064a
BC-1	1.26±0.007b	0.98±0.022a	1.10±0.020a	1.05±0.005ab	0.86±0.053b
BC-3	1.17±0.028c	0.88±0.011b	0.78±0.034b	0.87±0.020bc	0.80±0.048bc
BC-5	1.15±0.013c	0.80±0.005c	0.73±0.002c	0.79±0.047c	0.75±0.018c

植物体系内的迁移。

根富集系数和地上部转运系数分别代表根从土壤中吸收重金属的能力和重金属由植物根部向地上部转运的能力^[29],是评价植物吸收重金属状况的重要指标之一,系数越大代表该种元素越容易迁移^[30]。通过对本试验的根富集系数和地上部转运系数的分析可知,随生物炭施用量的增加油菜根部从土壤中吸收Cd的能力逐渐减弱,且Cd从根部向地上部转运的迁移量也相应降低(表3、表4),说明生物炭的添加可以通过改变土壤重金属Cd的形态,有效控制土壤重金属Cd在油菜根系中的积累及向地上部转运的能力。本研究结果表明,施用3%、5%生物炭处理的油菜鲜样中镉的含量分别为0.17、0.14 mg·kg⁻¹,与我国食品安全标准中新鲜叶菜蔬菜镉限量^[31](≤0.2 mg·kg⁻¹)相比,均未超标。

从长远来看,生物炭本身所含的大量元素及微量元素在土壤微生物及水分子的交互作用下会有一些程度的释放,为土壤及作物补充一定的养分,改善土壤理化性质,提高土壤肥力,促进作物生长,从而提高作物产量,对农业发展有一定的积极意义。但是目前多数研究者的研究周期较短,而且针对不同土壤类型和作物种类如何施用不同类型和用量的生物炭尚未统一。因此,还需在室内培养试验的基础上开展大量的生物炭长期田间试验研究。

4 结论

(1)生物炭的施用改变了土壤中Cd的形态分布,使活性较强的交换态Cd含量降低,而不易被植物吸收利用的有机结合态Cd和残渣态Cd含量增加。

(2)较高用量的生物炭施用提高了土壤pH,且可交换态Cd含量与土壤pH存在显著负相关关系($P < 0.05$),有机结合态Cd、铁锰氧化物结合态Cd及残渣态Cd含量与土壤pH存在显著正相关关系($P < 0.05$)。

(3)生物炭施用降低了油菜根富集系数和地上部转运系数,有效阻控重金属Cd进入植株中,5%的生物炭施用量作用效果显著。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[N]. 中国国土资源报, 2014-04-18(2版).
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report on the national general survey of soil contamination[N]. The Chinese newspaper of land and resources, 2014-04-18(2nd Edition).
- [2] 王玉军,刘 存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的

现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中的有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1465-1473.

WANG Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: Discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(8):1465-1473.

- [3] 宋 敏,齐 鹏,蔡立群,等. 不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9):1185-1195.
SONG Ming, QI Peng, CAI Li-qun, et al. Effect of different biochar application levels on greenhouse gas emissions in the Loess Plateau semi-arid environment in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(9):1185-1195.
- [4] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil: Concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2):9-20.
- [5] 易 卿,胡学玉,柯跃进,等. 不同生物质黑碳对土壤中镉(Cd)有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):88-94.
YI Qing, HU Xue-yu, KE Yue-jin, et al. Impact of different biomass black carbon amendments on retention capacity of cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2013, 32(1):88-94.
- [6] 张 迪,胡学玉,柯跃进,等. 生物炭对城郊农业土壤镉有效性及镉形态的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4):88-94.
ZHANG Di, HU Xue-yu, KE Yue-jin, et al. Effects of biochar on availability and speciation of cadmium (II) in suburb agricultural soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4):88-94.
- [7] 高瑞丽,朱 俊,汤 帆,等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):251-265.
GAO Rui-li, ZUN Jun, TANG Fan, et al. Fraction transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1):251-265.
- [8] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2):395-419.
- [9] 蒋田雨,姜 军,徐仁扣,等. 不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附Pb(II)的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1598-1604.
JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, et al. Effects of different temperatures biochar on adsorption of Pb(II) on variable charge soils [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4):1598-1604.
- [10] 李建宏,楚颖超,吴蔚东. 椰纤维生物炭添加对海南花岗岩砖壤吸附Pb(II)的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8):4553-4558.
LI Jian-hong, CHU Ying-chao, WU Wei-dong. Adsorption of Pb(II) on granite latosol from Hainan amended with coconut fiber-derived biochars[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(8):4553-4558.
- [11] 李如忠,徐晶晶,姜艳敏,等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1):88-96.
LI Ru-zhong, XU Jing-jing, JIANG Yan-min, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi stream in Tongling City[J]. *Research of Environmental*

- Sciences*, 2013, 26(1):88-96.
- [12] 刘克, 和文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1441-1448.
LIU Ke, HE Wen-xiang, ZHANG Hong, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [13] 曹莹, 邸佳美, 沈丹, 等. 生物炭对土壤外源镉形态及花生籽粒富集镉的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):688-693.
CAO Ying, DI Jia-mei, SHEN Dan, et al. Effects of biochar on soil cadmium forms and cadmium accumulation in peanut kernels[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):688-693.
- [14] Houben D, Sonnet P. Impact of biochar and root-induced changes on metal dynamics in the rhizosphere of *Agrostis capillaris* and *Lupinus albus*[J]. *Chemosphere*, 2015, 139(2):644-651.
- [15] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.
GAO Yi-dan, LIANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):258-261.
- [16] 王洋, 刘景双, 王金达, 等. 土壤pH值对冻融黑土重金属Cd赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):574-578.
WANG Yang, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da, et al. Effects of pH on the fraction transformations of Cd in phaeozem soil at the condition of freeze thaw cycles[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(2):574-578.
- [17] Méndez A, Gomez A, Paz-Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1354-1359.
- [18] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):3488-3497.
- [19] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2):105-112.
- [20] 丁文川, 田秀美, 王定勇, 等. 腐植酸对生物炭去除水中Cr(VI)的影响机制研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11):3847-3853.
DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, et al. Mechanism of Cr(VI) removal from aqueous solution using biochar promoted by humic acid[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11):3847-3853.
- [21] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2):187-198.
- [22] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 模拟酸雨对土壤重金属镉形态转化的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4):566-571.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Effect of simulated acid rains on Cd form transformation in contaminated soil[J]. *Soils*, 2009, 41(4):566-571.
- [23] 艾建超, 李宁, 王宁, 等. 污灌区土壤-蔬菜系统中镉的生物有效性及迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):491-497.
AI Jian-chao, LI Ning, WANG Ning, et al. The bioavailability and migration characteristics of cadmium in soil-vegetable system in sewage irrigation district[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2013, 32(3):491-497.
- [24] 许杨贵, 李琦, 刘晖, 等. 不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2059-2066.
XU Yang-gui, et al. Effects of different fertilizers on two genotype Chinese Flowering Cabbage in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2016, 35(11):2059-2066.
- [25] 蒋艳艳, 胡孝明, 金卫斌. 生物炭对镉污染土壤中镉形态的影响及其钝化效果[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(24):5984-5987.
JIANG Yan-yan, HU Xiao-ming, JIN Wei-bin. Effects of biochar application on different chemical forms of the pedologic cadmium and its passivation effect[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(24):5984-5987.
- [26] 毛懿德, 铁柏清, 叶长城, 等. 生物炭对重污染土壤镉形态及油菜吸收镉的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4):579-582.
MAO Yi-de, TIE Bo-qing, YE Chang-cheng, et al. Effects of biochar on forms and uptake of cadmium by rapeseed in cadmium-polluted soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4):579-582.
- [27] Park J H, Choppala G K, Bolan N S, et al. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1/2):439-451.
- [28] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 稻壳基生物炭对生菜Cd吸收及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业, 2015, 23(2):207-214.
WANG Yan-hong, LI Meng-jun, TANG Ming-deng, et al. Effect of rice husk biochar on lettuce Cd uptake and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2):207-214.
- [29] Audet P, Charest C. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1):231-237.
- [30] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤上油菜生长和重金属富集的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6):1057-1063.
HOU Yan-wei, CHI Hai-feng, BI Li-jun, et al. Effects of biochar application on growth and typical metal accumulation of rape in mining contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6):1057-1063.
- [31] 卫生部. GB 2762—2012 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 2762—2012 Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.