

陈建清, 郭 栋, 陈 德, 等. 生物质炭、有机肥和钙镁磷肥对三七(*Panax Notoginseng*)Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1909–1916.

CHEN Jian-qing, GUO Dong, CHEN De, et al. Influences of biochar, calcium magnesium phosphate and manure on Cd accumulation in *Panax Notoginseng* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1909–1916.

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¹, 郭 栋², 陈 德¹, 李恋卿^{1*}, 潘根兴¹

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 无限极(中国)公司, 广州 510623)

摘 要:选择生物质炭、钙镁磷肥、有机肥三种改良剂, 在云南三七主产区进行田间试验, 比较不同改良剂对降低五加科人参属三七(*Panax Notoginseng*)Cd 含量的效果。结果表明, 生物质炭和钙镁磷肥处理均显著降低了三七主根、剪口、茎、叶的 Cd 含量, 降低幅度分别为 25.4%~43.6%、40.2%~40.9%、34.3%~51.2% 和 33.0%~33.5%, 且生物质炭、钙镁磷肥处理下三七主根干重较对照分别显著提高 48.7% 和 50.4%; 生物质炭和钙镁磷肥处理土壤有效 Cd 含量分别减少 56.1% 和 58.1%, 表明生物质炭和钙镁磷肥能有效降低土壤 Cd 生物有效性、抑制三七 Cd 吸收。这与生物质炭和钙镁磷肥处理通过降低土壤酸性、提高土壤 CEC 及有机质含量有关。有机肥处理三七植株生物量和三七各部位 Cd 含量与对照相比均无显著差异。此外, 生物质炭和钙镁磷肥处理显著降低了三七主根、剪口、茎、叶 Cd 的富集系数(Accumulation coefficient, AF), 对三七 Cd 转移系数(Transfer coefficient, TF)影响则不显著, 而有机肥处理对三七 Cd 的 AF 与 TF 均无影响; 各处理三七须根 Cd 的 AF 在 2.84~4.64 之间, 显著高于其他部位, 而三七主根、剪口、茎、叶等部位 Cd 的 AF 和 TF 均小于 1, 表明三七须根对土壤 Cd 富集能力较强而转移能力较差, Cd 易集中于三七地下部, Cd 污染土壤中施用生物质炭与钙镁磷肥能有效降低 Cd 在三七体内的富集。

关键词: 生物质炭; 三七; 土壤; 有效态 Cd

中图分类号: X503.23 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)10-1909-08 doi:10.11654/jaes.2016-0353

Influences of biochar, calcium magnesium phosphate and manure on Cd accumulation in *Panax Notoginseng*

CHEN Jian-qing¹, GUO Dong², CHEN De¹, LI Lian-qing^{1*}, PAN Gen-xing¹

(1. Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Infinitus, Guangzhou 510623, China)

Abstract: A field trial was conducted to investigate the effects of biochar, calcium magnesium phosphate and manure on Cd uptake and accumulation by *Panax Notoginseng* in Yunnan Province. The results showed that biochar and calcium magnesium phosphate significantly increased the taproot biomass by 48.7% and 50.4% compared with control. Biochar and calcium magnesium phosphate significantly decreased Cd concentration in taproot, rhizome, leaf and stem by 25.4%~43.6%, 40.2%~40.9%, 34.3%~51.2% and 33.0%~33.5%. It may be attributed to the decreased acidity of soil, the increased soil organic matter and CEC, which resulted in decreased soil exchangeable Cd, with the application of biochar and calcium magnesium phosphate. The changes of biomass and Cd accumulation of *Panax Notoginseng* in manure treatment are not significantly compared to CK. The accumulation coefficients (AF) of Cd in *Panax Notoginseng* were decreased by addition of

收稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371298); 农业科技成果转化资金项目(2013GB23600666)

作者简介: 陈建清(1991—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属原位钝化修复研究。E-mail: cjqing8177@sina.com

* 通信作者: 李恋卿 E-mail: lqli@njau.edu.cn

biochar and calcium magnesium phosphate, respectively, but the Cd transfer coefficient (TF) of each part of *Panax Notoginseng* were not significant in biochar and calcium magnesium phosphate treatments. The AF of fibril root is about 2.84~4.64 in all treatments, but the AF and TF of any parts of *Panax Notoginseng* are less than 1.0 except fibril root. It means that the fibril root can accumulate Cd from contaminated soil easily, but it's difficult to transport the accumulated Cd from fibril root to other parts. The application of biochar and calcium magnesium phosphate could be an environmentally friendly and efficient way to remediate Cd contaminated acidic soils and improve the safety of *Panax Notoginseng*.

Keywords: biochar; *Panax Notoginseng*; soil; available Cd

随着我国中草药应用越来越广泛,中药材种植过程中的重金属污染引起了社会的普遍关注。韩小丽、赵连华等^[1-2]通过对我国 30 个产地的 259 种中药材的调查发现,Pb、Cd、Hg、As 和 Cu 等重金属的污染率分别达到 9.66%、26.35%、13.00%、9.32%、16.09%,其中 Cd 元素超标率最大。五加科人参属三七(*Panax Notoginseng*)是我国特有的一种多年生珍稀中药草,具有活血化瘀、消肿止痛等功效,对人体多种系统具有特殊生理活性^[3]。一方面,三七因生长特性而局限种植于云南省文山州、红河州等少数中高海拔地区,其种植地匮乏;另一方面,三七存在严重的连作障碍^[4],而近几年又出现了三七重金属污染的报道^[5-7]。冯光泉等^[8]研究发现,采自云南主产区的 48 个三七样品中,As、Pb、Hg、Cd 含量均出现超标,且三七植株对 Cd 表现出一定的富集作用。陈璐等^[9]分析文山、马关等 6 个三七种植区 30 个土壤和植株样本发现,三七主根、须根、茎、叶样本中 Cd 含量超标率分别为 13.3%、40%、20%、6.6%,土壤样本 Cd 含量超标率达 60%。三七 Cd 污染可能是由于其种植地土壤 Cd 背景含量偏高造成的^[10],也可能与种植区矿山开发带来的工业重金属污染相关联^[11]。目前,对三七的重金属污染成因、分布状况的调查研究较多,但有关三七种植过程中降低 Cd 吸收的技术措施研究报道还较少。

近年来,生物质炭作为生物质废弃物循环利用的有效措施成为研究热点。生物质炭是生物质废弃物在限氧条件下通过热裂解产生的含碳丰富、难溶、稳定、高度芳香化的固体物质^[12-13],其表面含有丰富的-COOH、-COH 和-OH 等含氧官能团及磷酸、碳酸盐等矿物组分,具有较大的比表面积、较高的化学和生物学稳定性^[14-15]。施用生物质炭可提高土壤 pH 值、增加土壤的 CEC 及有机质含量^[16],有效降低土壤中重金属和农药对植物的毒害,还可以调节土壤的孔隙度和提高其保水能力,促进土壤养分循环和植物生长^[17]。生物质炭用于抑制污染农田粮食作物重金属的吸收已有较多的报道^[18],但对中药材重金属吸收

及其对中药材生长影响的研究还少有报道。因此,本研究通过田间试验,采用生物质炭作为土壤改良剂,以有机肥、钙镁磷肥两种传统改良剂^[19]为对比,探究不同改良剂对三七重金属吸收的影响,以期为保障重金属污染土壤中三七的质量安全提供有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2013 年 12 月 18 日在云南省某三七种植区布置了田间试验。试验点位于亚热带高原地区,受西南季风控制,具明显的低纬度山地季风气候,年平均气温 14.7℃,年平均降雨量 1500 mm,海拔 2180 m。试验前茬作物为玉米。试验地土壤类型为红壤,pH 4.95(土水比 1:2.5)、CEC 16.60 cmol·kg⁻¹、有机质(SOM)含量 52.19 g·kg⁻¹、总 Cd 含量 7.99 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

试验用生物质炭购自河南商丘三利新能源有限公司,是小麦秸秆在连续竖式炭化窑炉经 350~450℃限氧热裂解制得的麦秸炭,其 pH 值为 9.19(炭水比 1:20)^[20]、CEC 为 92 cmol·kg⁻¹、有机碳含量 680.5 g·kg⁻¹、速效磷 1.30 g·kg⁻¹、全钾 108.32 g·kg⁻¹、碳酸根 26.40 cmol·kg⁻¹、二氧化硅 813.08 mg·kg⁻¹、比表面积 29.97 m²·g⁻¹。有机肥为采购于南京六合区市场普通有机肥,其主要原料为畜禽粪便,pH 5.43(土水比 1:2.5),CEC 为 7.34 cmol·kg⁻¹;钙镁磷肥采购于南京江宁区某肥料批发市场,P₂O₅>15%,pH 9.46(土水比 1:2.5)。

1.3 试验设计

田间试验设置 4 个处理。对照处理(CK):以不施用改良剂处理为对照;生物质炭处理(BC):小麦秸秆炭的施用量为 15 t·hm⁻²;有机肥处理(M):有机肥的施用量为 750 kg·hm⁻²;钙镁磷肥处理(P):钙镁磷肥施用量为 300 kg·hm⁻²。此外,各处理均按当地种植习惯施用等量化肥。小区面积为 2 m²(1 m×2 m),每个处理 3 个重复,共 12 个小区并随机排列,小区间以 30 cm 间隔作为保护行防止互渗。改良剂在 2014 年 1 月

7 日三七移栽前一周一次性均匀施入土壤,与 0~20 cm 耕层土壤充分混匀。挑选健康、长势均一的三七苗移栽种植,种植密度和管理模式与常规种植相同。于 2015 年 10 月在三七收获前测量株高,并分别采集主根、须根、茎、叶等部位及 0~15 cm 耕层土壤样品。

1.4 试验测定项目及方法

植株样品先用自来水反复冲洗,再用超声清洗,然后用去离子水淋洗多次,置于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,60 ℃烘干至恒重称算生物量,然后用不锈钢粉碎机粉碎过 60 目尼龙筛备用。根际土壤样品在自然风干后,挑出其中的动植物残体和石砾等非土壤物质,过 20 目尼龙筛后部分用作土壤含水量、有效 Cd 含量、土壤 pH、土壤 CEC 等理化性质的测定;另取 10~20 g 土壤样品用玛瑙研钵磨碎过 100 目尼龙筛,用于测定土壤总 Cd、土壤 SOM 等理化性质的测定。土壤及植株样品分析采用鲁如坤^[21]常规分析方法。土壤 pH 按土水质量比 1:2.5,用 pH 计测定;土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加热法测定;CEC 采用乙酸铵法测定;三七植株 Cd 含量采用 4:1 硝酸-高氯酸消煮,土壤总 Cd 采用硝酸-高氯酸-氢氟酸全量分解法消解,土壤有效 Cd 采用土水比 1:10 的 CaCl_2 (0.01 mol·L⁻¹)浸提液振荡 2 h 后过滤,上述所有 Cd 测定均采用原子吸收分光光度法测定(北京普析通用仪器有限责任公司, A3),并采用标准物质做回收试验以控制试验精准度,标准物质回收率均在 85%~115% 允许误差范围内。

根据三七植株各部位 Cd 含量,分别计算各部位 Cd 的富集系数(Accumulation coefficient, AF)和转移系数(Transfer coefficient, TF),计算公式如下:

富集系数(AF)=植物体或某器官中某元素的含量/该元素在土壤中的含量^[22]

转移系数(TF)=植株地上部某元素含量/根系该元素含量^[23]

1.5 数据处理与统计分析

数据采用 SPSS 16.0 和 Microsoft Excel 2013 进行统计分析,处理间差异显著性($P<0.05$)用单因素方差分析进行计算,并采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较,所有数据均以平均值±标准差的形式列出($n=3$)。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对三七生物量的影响

三种改良剂对三七生物量的影响见表 1。不同处理间三七株高和须根重均无显著差异;生物质炭、钙镁磷肥处理下三七主根干重较对照显著性提高 48.7%与 50.4%;钙镁磷肥处理与有机肥处理三七剪口、茎、叶生物量较对照均无显著性差异,而生物质炭处理下三七剪口、茎、叶干重较对照、钙镁磷肥处理、有机肥处理相比分别显著提高 30.3%~36.5%、21.6%~35.4%和 19.6%~35.8%。关于生物质炭促进作物生长、提高玉米、水稻等农作物产量的报道较多^[24]。这可能是由于生物质炭具有多孔结构和较大比表面积,从而提高土壤孔隙度、降低土壤容重和密度,为三七根系提供了良好的生长环境^[25];同时,生物质炭自身含有大量离子、碱性物质以及多种官能团,可以提高土壤养分含量,降低土壤酸性,其较强的吸附能力能够提高对土壤中养分的吸附保蓄能力,减少养分流失,为三七生长提供充足的营养物质^[26]。

2.2 不同处理对三七植株各部位 Cd 吸收的影响

三七植株不同部位 Cd 含量见图 1。生物质炭处理三七主根、剪口、茎、叶 Cd 含量较对照分别显著下降 25.4%、40.9%、34.3%、33.0%,但须根中 Cd 含量与对照相比无显著差异。钙镁磷肥处理下三七主根、剪口、茎、叶、须根 Cd 含量较对照分别显著降低 43.6%、40.2%、51.2%、33.5%、48.1%,但生物质炭与钙镁磷肥处理相比,三七各部位 Cd 含量无显著差异。有机肥

表 1 不同改良剂处理对三七株高及单株植株生物量的影响

Table 1 Effect of amendments on growth of *Panax Notoginseng*(dry weight)

处理 Treatments	株高 Height/cm	须根 Fibril/g	剪口 Rhizome/g	主根 Taproot/g	叶片 Leaf/g	茎 Stem/g
CK	62.78±3.67a	1.30±0.05a	1.97±0.53b	7.29±1.88b	2.54±0.31b	2.22±0.07b
M	65.67±3.75a	1.68±0.38a	2.10±0.34b	6.49±0.52b	2.92±0.35b	2.41±0.61b
P	65.17±5.17a	1.49±0.27a	2.16±0.66b	10.97±2.66a	3.08±0.27b	2.78±0.39ab
BC	67.17±6.24a	1.71±0.48a	3.10±0.57a	10.85±0.87a	3.93±0.49a	3.46±0.59a

注:CK、M、P、BC 分别代表空白对照、有机肥处理、钙镁磷肥处理、生物质炭处理;表内同一列中有相同字母表示处理间无显著差异,不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。下同。

Note: Data suffixed with the same letters in the same column mean no significant difference at $P<0.05$. The same as follows.

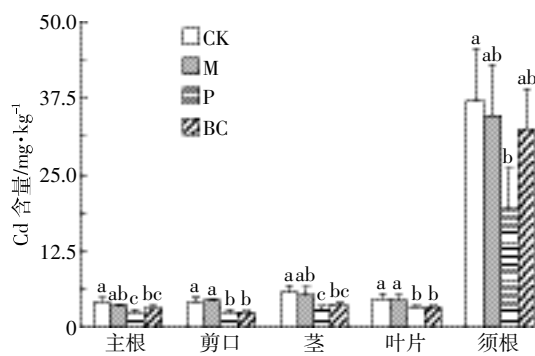


图1 不同处理下三七各部位 Cd 含量

Figure 1 Cd contents in different parts of *Panax Notoginseng* in different treatments

处理下三七植株各部分 Cd 含量较对照均无显著性差异。

三七生长过程通过须根吸收土壤中的 Cd 并不断向地上部转移,三七植株 Cd 的富集系数(AF)见表2。三七须根 Cd 的富集系数较高,AF 值变化范围为2.84~4.64,其他部位 Cd 的 AF 值均在0.29~0.65,表明三七须根中 Cd 的富集强度远大于其他部位。这与罗春玲等^[27]研究的大多数植物吸收的重金属主要积累在根系而地上部含量较低的结果一致,可能是植物根系通过使 Cd 主要分布在质外体,或形成磷酸盐、碳酸盐沉淀,或与细胞壁结合将 Cd 沉积于须根根尖细胞壁上,从而阻止 Cd 进入细胞原生质以减轻其毒害^[28]。生物质炭和钙镁磷肥处理较对照均显著降低了三七主根、剪口、茎、叶 Cd 的 AF 值,降低幅度分别为25.4%~43.6%、40.2%~40.9%、34.3%~51.2%和32.9%~33.5%,但钙镁磷肥与生物质炭处理相比,三七各部位

Cd 的 AF 值差异不显著。有机肥处理下三七各部位 Cd 的 AF 值较对照均无显著性差异。由表2可知,三七主根、茎、叶片和剪口 Cd 的 TF 分别为0.10~0.12、0.11~0.15、0.10~0.13和0.07~0.13,各处理间 Cd 的 TF 值均无显著差异。一般将 TF>1 的作物称为对该元素转移能力强的作物^[29],三七各部位 TF 值均小于1,说明三七植株中的 Cd 从地下部向地上部的转移能力较弱。陈璐等^[9]研究也表明,三七中 Cd 的自下而上的转移能力较差,较易集中于三七根部,而三七主根作为主要药用部位。因此,降低三七根部 Cd 的吸收对三七药品质量安全十分重要。

2.3 土壤有效 Cd 含量的变化及其影响因素

三种改良剂处理下土壤有效 Cd 含量的变化结果见图2A。与对照相比,钙镁磷肥和生物质炭处理土壤有效 Cd 含量分别显著性降低了56.1%和55.4%,而有机肥处理土壤有效 Cd 含量较对照差异不显著。相关分析结果表明,三七剪口、茎、叶部位 Cd 含量与土壤有效 Cd 均呈显著正相关关系,相关系数分别为0.960、0.979和0.983(表3)。这与龚伟群等^[30]指出的土壤-植株体系中 Cd 的迁移与积累取决于土壤中的有效 Cd 含量的研究结果一致。Chen 等^[31]研究也表明,水稻籽粒中镉的含量与土壤有效 Cd 含量显著相关。由此可见,生物质炭和钙镁磷肥降低土壤 Cd 有效性是减少三七各部位 Cd 吸收的关键。图2C与图2D表明,生物质炭处理土壤有机质含量与 CEC 较其他3个处理分别显著提高27.6%~29.7%和8.2%~8.6%。生物质炭降低 Cd 有效性的效应可能与其提高土壤有机质含量以及 CEC 有关^[32-33];土壤有机质作为

表2 各处理下三七 Cd 富集系数及转移系数

Table 2 Comparison of Cd transfer coefficient and accumulation coefficient between different treats of *Panax Notoginseng*

系数 Coefficient	处理 Treatments	须根 Fibril	主根 Taproot	剪口 Rhizome	茎 Stem	叶片 Leaf
富集系数 (AF) Accumulation coefficient	CK	4.69±1.58aA	0.52±0.08aB	0.51±0.11aB	0.71±0.14aB	0.58±0.11aB
	M	4.36±1.08abA	0.42±0.05abB	0.57±0.01aB	0.66±0.17abB	0.56±0.11aB
	P	2.86±0.34bA	0.29±0.06cB	0.30±0.05bB	0.35±0.11cB	0.39±0.06bB
	BC	4.08±0.86abA	0.39±0.03bcB	0.30±0.02bB	0.47±0.06bcB	0.39±0.04bB
转移系数 (TF) Transfer coefficient	CK	—	0.12±0.02aA	0.12±0.06aA	0.17±0.09aA	0.13±0.02aA
	M	—	0.10±0.03aA	0.14±0.03aA	0.15±0.02aA	0.13±0.02aA
	P	—	0.10±0.01aA	0.11±0.02aA	0.12±0.03aA	0.14±0.01aA
	BC	—	0.10±0.01aA	0.08±0.02aA	0.12±0.02aA	0.10±0.02aA

注:小写字母代表同一部位不同处理间的系数差异性分析,大写字母代表同一处理不同部位间系数的差异性分析,不同字母代表差异性显著($P<0.05$)。

Note: a, b, c means the analysis of different treatments in the same part of *Panax Notoginseng*; A, B, C means the analysis of different parts of *Panax Notoginseng* in the same treatment, the same column means no significant difference at $P<0.05$.

可吸附态 Cd 的吸附位点与螯合剂, 为土壤中可吸附态 Cd 提供有效载体, 从而减少土壤有效 Cd 含量; 土壤 CEC 的提高为可吸附态 Cd 提供更多吸附位点, 进一步降低 Cd 的生物有效性。

此外, 许多研究表明, 施用生物质炭和钙镁磷肥在一定时期内均可显著提高土壤的 pH^[34-35], 土壤 pH 的提高一方面促使 Cd 离子水解为吸附作用更强的 Cd(OH)⁺ 并被土壤胶体及相关官能团吸附螯合, 降低土壤有效 Cd 含量^[36]; 另一方面通过增强土壤胶体负

电荷性、减弱 H₃O⁺ 竞争作用, 使得有机质、锰氧化物等载体与重金属结合更牢固^[37], 达到降低土壤 Cd 生物有效性的效果。本研究中生物质炭与钙镁磷肥处理的土壤 pH 与对照相比没有显著差异(图 2B), 可能由于土壤样品是在改良剂施用近两年后采集, 生物质炭与钙镁磷肥中的碱性物质部分淋失^[38], 对土壤的石灰效应会随时间的推移而逐渐减弱^[31]。钙镁磷肥对土壤中 Cd 有效性的影响一方面与其水解产生的 Ca²⁺、Cd²⁺ 的共沉淀, 有利于交换态 Cd 向碳酸盐结合态 Cd 转

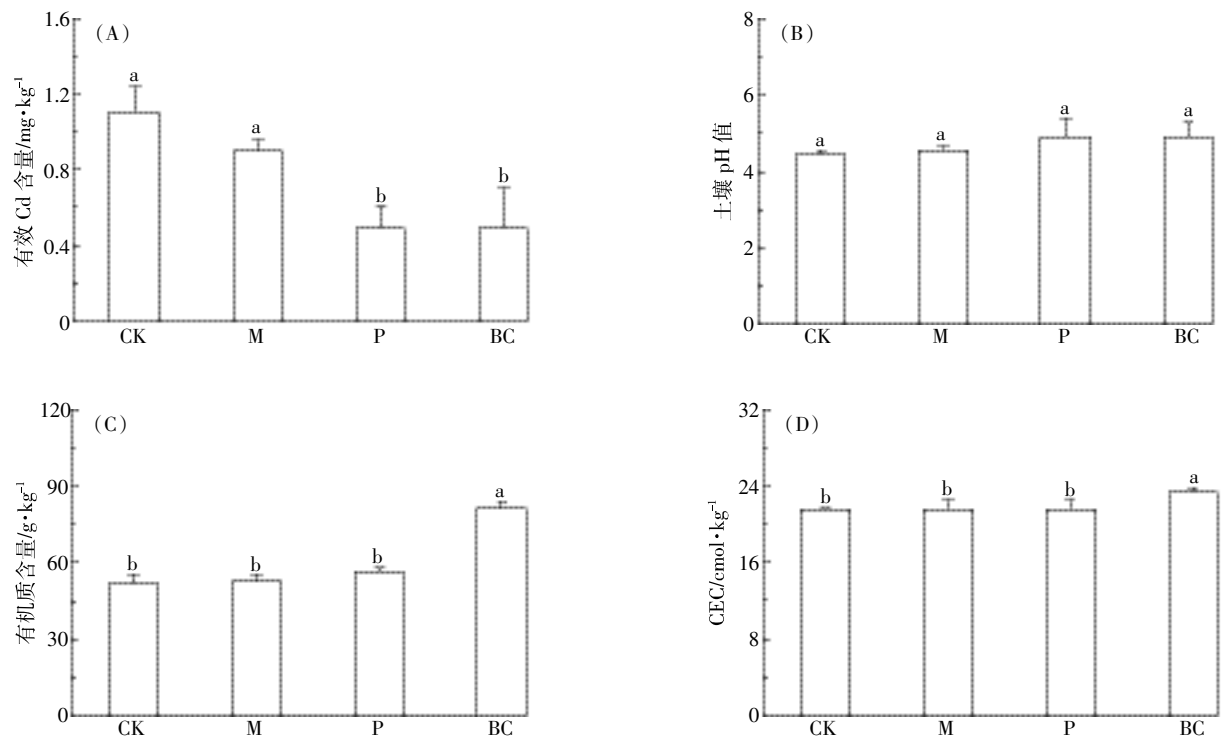


图 2 各处理对土壤基本理化性质的影响

Figure 2 Effects of amendments on basic physico-chemical properties of tested soils

表 3 三七 Cd 含量与土壤理化性质相关性分析

Table 3 Correlation coefficients of Cd uptake of *Panax Notoginseng* with basic physico-chemical properties of tested soil

	pH	SOM	EXCd	CEC	主根 Taproot	剪口 Rhizome	茎部 Stem	叶片 Leaf	须根 Fibril
pH	1								
SOM	-0.297	1							
EXCd	-0.595	-0.487	1						
CEC	-0.195	0.994**	-0.576	1					
主根 Taproot	-0.770	-0.070	0.900	-0.171	1				
剪口 Rhizome	-0.643	-0.529	0.960*	-0.618	0.804	1			
茎部 Stem	-0.740	-0.359	0.979*	-0.458	0.921	0.972*	1		
叶片 Leaf	-0.644	-0.505	0.983*	-0.595	0.852	0.995**	0.986*	1	
须根 Fibril	-0.955*	0.192	0.748	0.085	0.921	0.723	0.846	0.750	1

注: $n=4$, * 表示 $P<0.05$ 显著相关, ** 表示 $P<0.01$ 显著相关。

Note: $n=4$, * Correlation is significant at the 0.05 level, ** Correlation is significant at the 0.01 level.

变有关;另一方面,磷酸根与 Cd^{2+} 作用形成在土壤中较为稳定的溶解度较低的化合物,达到降低土壤有效 Cd 含量的作用效果^[39]。有机肥对土壤重金属有效性的作用机制较复杂,主要通过改变土壤 pH 值或腐殖化过程中产生的腐殖质与金属离子的络合来影响重金属的活性。李平等^[40]研究发现,施用有机肥 120 d 后显著降低了交换性镉的含量,能够使土壤重金属由有效态向某些潜在有效态或无效态转变;但章明奎等^[38]研究结果表明,施用有机肥 3 年后对水溶性镉没有显著影响,有机改良剂对土壤重金属的稳定效果随时间推移、有机物质的逐渐降解而下降。本研究中有有机肥对土壤中 Cd 的钝化效果不显著,虽然有机肥能增加土壤 Cd 的吸附位点,但其吸附态 Cd 主要以活性非紧密型有机结合态为主^[41],有机肥分解过程中部分结合态 Cd 又被释放成为有效 Cd^[42],从而降低了有机肥对 Cd 污染土壤的改良效果。

3 结论

(1) 生物质炭与钙镁磷肥具有促进三七生长的作用,施用有机肥对三七植株生物量无影响。

(2) 生物质炭与钙镁磷肥处理的改良效果较好: 生物质炭和钙镁磷肥处理三七主根、剪口、茎、叶的 Cd 含量均显著降低。相关分析结果表明,三七剪口、茎、叶部位 Cd 含量与土壤有效 Cd 均呈显著正相关关系。生物质炭与钙镁磷肥处理通过提高土壤 CEC 及有机质含量为土壤有效 Cd 提供稳定载体,降低 Cd 生物有效性,从而减少了三七植株 Cd 含量。有机肥处理土壤有效 Cd 含量及三七 Cd 的吸收较对照均无显著差异。

(3) 三七须根 Cd 富集系数范围在 2.84~4.64,主根、剪口、茎、叶等部位 Cd 的富集系数和转移系数均小于 1,三七须根具有富集土壤 Cd 的效应,且 Cd 在三七中的转移能力较差,易集中于三七地下部,施用生物质炭和钙镁磷肥均可降低土壤 Cd 的生物有效性,确保三七药用质量安全。

参考文献:

- [1] 韩小丽, 张小波, 郭兰萍, 等. 中药材重金属污染现状的统计分析[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(18): 2041-2048.
HAN Xiao-li, ZHANG Xiao-bo, GUO Lan-ping, et al. Statistical analysis of residues of heavy metals in Chinese crude drugs[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008, 33(18): 2041-2048.
- [2] 赵连华, 杨银慧, 胡一晨, 等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199-1208.

- ZHAO Lian-hua, YANG Yin-hui, HU Yi-chen, et al. Current situation analysis and countermeasures on contamination of heavy metal in traditional Chinese medicinal materials in China[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2014, 45(9): 1199-1208.
- [3] 王莹, 褚扬, 李伟, 等. 三七中皂苷成分及其药理作用的研究进展[J]. 中草药, 2015, 46(9): 1381-1392.
WANG Ying, CHU Yang, LI Wei, et al. Advances in study on saponins in *Panax notoginseng* and their pharmacological activities [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2015, 46(9): 1381-1392.
- [4] 刘莉, 刘大会, 金航, 等. 三七连作障碍的研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2011, 30(1): 70-75.
LIU Li, LIU Da-hui, JIN Hang, et al. Overview on the mechanisms and control methods of sequential cropping obstacle of *Panax notoginseng* F. H. Chen[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2011, 30(1): 70-75.
- [5] 冯光泉, 刘云芝, 张文斌, 等. 三七药材神污染途径研究[J]. 中药材, 2005, 28(8): 645-647.
FENG Guang-quan, LIU Yun-zhi, ZHANG Wen-bin, et al. Study on dynamics of tannin in different growth phase of *cynomorium songaricum* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2005, 28(8): 645-647.
- [6] 郝南明, 田洪, 苟丽. 三七生长初期不同部位重金属元素含量测定[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(5): 27-28, 31.
HAO Nan-ming, TIAN Hong, GOU Li, et al. The testing of heavy metal elements in different parts of Wenshan ginseng at different stages[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2004, 21(5): 27-28, 31.
- [7] 林龙勇, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2868-2875.
LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, et al. Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2868-2875.
- [8] 冯光泉, 刘云芝, 张文斌, 等. 三七植物体中重金属残留特征研究[J]. 中成药, 2006, 28(12): 1796-1798.
FENG Guang-quan, LIU Yu-zhi, ZHANG Wen-bin, et al. Study on heavy metal residues characteristics of *Panax notoginseng* plant[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2006, 28(12): 1796-1798.
- [9] 陈璐, 米艳华, 林昕, 等. 土壤-三七系统重金属污染调查及相关分析[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(14): 2608-2613.
CHEN Lu, MI Yan-hua, LIN Xin, et al. Investigation and analysis of heavy metal pollution related to soil-*Panax Notoginseng* system[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39(14): 2608-2613.
- [10] 曾鸿超, 张文斌, 冯光泉, 等. 文山三七栽培土壤铜、铅、镉和锌含量水平及污染评价[J]. 中成药, 2009, 31(2): 317-320.
ZENG Hong-chao, ZHANG Wen-bin, FENG Guang-quan, et al. The Cu, Pb, Cd, and Zn content and pollution evaluation of *Panax notoginseng* cultivated soil in Wenshan[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2009, 31(2): 317-320.
- [11] 金航, 崔秀明, 陈中坚, 等. 三七栽培土壤地质背景分区特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2009, 31(增刊1): 440-445.
JIN Hang, CUI Xiu-ming, CHEN Zhong-jian, et al. District characteristic of geological background soil on cultivation in *Panax notoginseng* [J]. *Journal of Yunnan University*, 2009, 31(Suppl1): 440-445.

- [12] 孙 璇,李恋卿,潘根兴,等.不同作物原料生物质炭对溶液Cd的吸附特性[J].农业环境科学学报,2014,33(8):1637-1643.
SUN Xuan, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Adsorption of pyrene from aqueous solution by biochars produced from different crop residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1637-1643.
- [13] 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 Rui-yue, CHEN De, LI Lian-qing, 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.
- [14] 张 斌,刘晓雨,潘根兴,等.施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J].中国农业科学,2012,45(23):4844-4853.
ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844-4853.
- [15] 刘莹莹,秦海芝,李恋卿,等.不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附特性[J].生态环境学报,2012,21(1):146-152.
LIU Ying-ying, QIN Hai-zhi, LI Lian-qing, et al. Adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} in aqueous solution by biochars produced from the pyrolysis of different crop feedstock[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1):146-152.
- [16] 王维锦,李 彬,李恋卿,等.低温热裂解处理对猪粪中重金属的钝化效应[J].农业环境科学学报,2015,34(5):994-1000.
WANG Wei-jin, LI bin, LI Lian-qing, et al. Influence of low-temperature pyrolysis treatment on bioavailability of heavy metals in pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):994-1000.
- [17] 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-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. 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.
- [18] 李 晓,张吉旺,李恋卿,等.施用生物质炭对黄淮海地区玉米生长和土壤性质的影响[J].土壤,2014,46(2):269-274.
LI Xiao, ZHANG Ji-wang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar amendment on maize growth and soil properties in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Soils*, 2014, 46(2):269-274.
- [19] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
CHEN Yi-qun, DONG Yuan-hua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3):1282-1289.
- [20] Nguyen B T, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(8):846-853.
- [21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- LU Ru-kun. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] 张红振,骆永明,章海波,等.水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J].环境科学,2010,31(2):488-495.
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereals[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2):488-495.
- [23] Yu Z, Zhou Q. Growth responses and cadmium accumulation of *Mirabilis jalapa* L. under interaction between cadmium and phosphorus [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1):38-43.
- [24] Bian R J, Joseph S, Cui L Q, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 272:121-128.
- [25] 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 Jin-hua, XU Ren-kou. 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.
- [26] Sfinchez M, Gonzfilez J L. The fertilizer value of pig slurry: I. Values depending on the type of operation[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(10):1117-1123.
- [27] 罗春玲,沈振国.植物对重金属的吸收和分布[J].植物学通报,2003,20(1):59-66.
LUO Chun-ling, SHEN Zhen-guo. The mechanisms of heavy metal uptake and accumulation in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, 20(1):59-66.
- [28] Liang Y, Wong J, Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2005, 58(4):475-483.
- [29] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q. Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3):305-311.
- [30] 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 Wei-qun, PAN Gen-xing. 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.
- [31] Chen D, Guo H, Li R Y, et al. Low uptake AF finity 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.
- [32] Bian R, Chen D, Liu X, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: Results from a cross-site field experiment[J]. *Ecol Eng*, 2013, 58:378-383.
- [33] Laird D A, Fleming P, Davis D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):443-449.
- [34] 李瑞美,王 果,方 玲,等.钙镁磷肥与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果[J].土壤与环境,2002,11(4):348-351.
LI Rui-mei, WANG Guo, FANG Ling, et al. Effects of complexation of

- calcium, magnesium, phosphate with organic manure on Cd, Pb uptake by crop[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):348-351.
- [35] Lu K, Yang X, Shen 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.
- [36] 宗良纲, 张丽娜. 3种改良剂对不同土壤-水稻系统中Cd行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):834-840.
- ZONG Liang-gang, ZHANG Li-na. Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2006, 25(4):834-840.
- [37] 雷 鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. 生态环境, 2007, 16(5):1551-1556.
- LEI Ming, LIAO Bo-han, QIN Pu-feng. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5):1551-1556.
- [38] 章明奎, 唐红娟, 常跃畅. 不同改良剂降低矿区土壤水溶态重金属的效果及其长效性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):144-148.
- ZHANG Ming-kui, TANG Hong-juan, CHANG Yue-chang. Long-term effects of different amendments on reduction of water soluble heavy metals in a mine contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5):144-148.
- [39] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35(4):525-545.
- [40] 李 平, 王兴祥, 郎 漫, 等. 改良剂对Cu, Cd污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7):1241-1249.
- LI Ping, WANG Xing-xiang, LANG Man, et al. Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7):1241-1249.
- [41] 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, 38(2):212-218.
- ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, JIANG Yang. Effects of organic manure on the amelioration of Cd polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):212-218.
- [42] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1302-1309.
- WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1302-1309.