



生物炭对弱碱性土壤烤烟 Cd 吸收及 转运富集特征的影响

叶协锋¹, 周涵君¹, 于晓娜¹, 张晓帆¹, 付仲毅¹, 马静¹, 秦焱鹤¹, 韩秋静¹, 徐敏²

1 河南农业大学烟草学院 国家烟草栽培生理生化研究基地 烟草行业烟草栽培重点实验室, 郑州 450002;

2 河南省烟草公司 河南郑州 450000

摘要: 【目的】通过研究施用生物炭后烤烟对 Cd 的吸收效应及分配富集特征, 来阐明生物炭对 Cd 污染植烟土壤的修复及对烤烟 Cd 含量的降低效果。【方法】于 2015 年采用盆栽试验 (每盆装土 25 kg), 选取豫中地区弱碱性土壤, 外源添加 Cd 0 mg/kg (G0)、50 mg/kg (G1)、100 mg/kg (G2), 分别添加生物炭 0 g/盆 (T0)、300 g/盆 (T1)、600 g/盆 (T2), 采用二因素试验共计 9 个处理, 分别为: G0T0、G0T1、G0T2、G1T0、G1T1、G1T2、G2T0、G2T1、G2T2。测定各处理的土壤 pH 值、土壤有效态 Cd 含量, 并分析烟株采收时不同部位 Cd 含量和烟株对 Cd 的转运及富集系数。【结果】(1) 土壤 pH 值随生物炭施用量的增加而升高, 处理 G2T2 的土壤 pH 值最大, 为 7.81; 土壤有效态 Cd 含量随生物炭施用量的增加呈现降低的趋势。(2) 土壤 Cd 含量与烟株叶片中的 Cd 含量呈极显著正相关关系, 且在同一污染水平下, 施加生物炭后, 烟株各部位叶对 Cd 的吸收呈显著降低的趋势。(3) 施用生物炭的处理, 烟株整体对 Cd 的转运系数降低, 烟株根系对 Cd 的富集系数升高, 叶片对 Cd 的富集系数降低。【结论】在 Cd 污染土壤种植烤烟时适量施用生物炭可以降低土壤有效态 Cd 含量, 从而降低烟叶 Cd 含量。

关键词: 烤烟; 生物炭; Cd; 吸收; 转运富集

引用本文: 叶协锋, 周涵君, 于晓娜, 等. 生物炭对弱碱性土壤烤烟 Cd 吸收及转运富集特征的影响 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (5)

土壤是不可缺少、不可再生的自然资源, 是人类赖以生存的物质基础。随着工业、城市污染的加剧和农用化学物质种类、数量的增加, 土壤重金属污染日益严重。镉 (Cd) 是农田土壤中存在的毒性较大且相对普遍的一种重金属元素, 它可以沿着食物链传递进而危害人类健康^[1]。对于烟草, 烤烟中的 Cd 会通过抽吸过程中的烟气进入人体^[2], 危害人体健康。与其他重金属元素相比, Cd 在烟气中的迁移率较高, 人体通过烟气累积的 Cd 量显著高于烤烟中的其他金属元素^[3], 而烟丝重金属的含量与烟叶的重金属含量密切相关, 与植烟土壤中有效态重金属含量呈正相关^[4]。因此, 治理植烟土壤的 Cd 污染是降低烟叶 Cd 含量的关键。

目前, 对土壤 Cd 污染治理方法的研究比较多, 主要有工程治理方法、化学法、生物法及农业治理法^[5-6], 其中化学法主要是施用改良剂或抑制剂等化

学物质以降低土壤中 Cd 的水溶性、扩散性和生物有效性, 从而减弱其毒害作用, 常用的物质有磷酸盐、石灰、硅酸盐等^[7-8]。生物炭是近年来研究的热点, 生物炭是生物质在缺氧条件下经过热解炭化后形成的具有多孔特性类似木炭的富含碳元素的产物^[9], 具有良好的孔隙结构和较大的比表面积^[10-11], 具备很强的吸附能力, 因此生物炭能够作为一种吸附质来吸附重金属, 降低污染物在土壤中的富集, 减轻污染程度。生物炭还可以通过提高土壤 pH, 降低重金属在土壤中的移动性, 对重金属起到固定作用^[12]。陈坦等^[13]研究表明污泥基生物炭对重金属具有较好的吸附性能, 侯艳伟等^[14]研究在重金属含量高的矿区土壤附近施用生物炭后, 油菜的产量提高且油菜对 Cd 的富集系数降低, 曹莹等^[15]以花生为研究对象, 发现在 Cd 污染土壤中施用生物炭后, 花生籽粒镉含量降低。作者前期

基金项目: 烟草行业烟草栽培重点实验室项目 (No.30800665); 河南省烟草公司项目 (No.HYKJ201301); 重庆市烟草公司项目 (No.NY20140401070010)

作者简介: 叶协锋 (1979—), 博士, 副教授, 从事烟草栽培生理和土壤改良, Tel: 0371-63555713, Email: yexiefeng@163.com

收稿日期: 2017-03-07; 网络出版日期: 2017-06-02

研究表明,施用生物炭可以较好地改良植烟土壤碳库,改善烤后烟叶品质^[16]。在此基础上,本文利用农业废弃物烟秆炭化的固体产物——烟秆生物炭(以下简称烟秆炭)作为Cd污染土壤的改良剂,研究在不同浓度Cd胁迫和不同用量烟秆炭处理下,烤烟各部位中Cd含量,重点研究生物炭对烤烟Cd迁移转运及富集的影响,以期明确生物炭在烤烟对Cd的吸收积累、调控烟草Cd含量的效应,为Cd污染烟田改良提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用盆栽试验,于2015年在河南农业大学科教园区进行,盆栽用土取自平顶山郟县大田耕层,土壤质地为壤土,将土壤风干后,过5 mm筛,每盆装土25 kg。土壤pH值为7.12,有机质含量为13.65 g·kg⁻¹,碱解氮含量为42.12 mg·kg⁻¹,速效磷含量为38.67 mg·kg⁻¹,速效钾含量为77.23 mg·kg⁻¹,有效态Cd含量为0.12 mg·kg⁻¹。品种为中烟100。试验用盆为塑料盆,上口直径为38 cm,下口直径为35 cm,高度为30 cm。试验前,先在试验地上起垄,按120 cm×50 cm的行株距,将盆置于垄沟内,再对垄沟进行封土,把盆体埋于土中。烟秆炭购自河南省三利新能源有限公司,在450℃低氧条件下制作,pH为9.67,全碳75.6%,CEC(阳离子交换量)85.65 cmol/kg,BET比表面积6.072 m²/g,平均孔径为2.769 nm。

1.2 试验设计

本实验为二因素试验,外源添加Cd 0 mg/kg (G0)、50 mg/kg (G1)、100 mg/kg (G2),Cd为硝酸镉(分析纯),以固体形态加入,再分别添加生物炭0 g/盆(T0)、300 g/盆(T1)、600 g/盆(T2),生物炭为过10目筛的烟秆炭,共计9个处理,分别为:G0T0、G0T1、G0T2、G1T0、G1T1、G1T2、G2T0、G2T1、G2T2,每个处理20个重复。每盆施纯氮3.5 g,N:P₂O₅:K₂O为1:2:3,所用肥料为硝酸铵、Ca(H₂PO₄)₂、硫酸钾,均为分析纯。按照试验设计的肥料及外源添加物与土壤均匀混合后装入塑料盆中,土壤平衡一周后选择健康,长势均匀一致的烟苗移栽,每盆一株。选择其他管理措施与优质烟叶栽培管理措施一致。

1.3 测定项目与方法

烟株移栽后90 d,分别采集土壤和烤烟植株样品。在烟株根系附近取土壤样品,混匀,风干,过10目筛备用。土壤pH值用酸度计(PHS-3C,上海精密科学仪器)测定,固液比值为m(固):V(液)=1:2.5。土壤有效态Cd测定参照国标GB/T 23739-2009,采用

DTPA浸提剂浸提,ICP-OES电感耦合等离子原子发射光谱仪测定。

各处理分别取3株长势一致的烟株,用自来水洗净后再用去离子水冲洗数遍,分根、茎、叶,叶分为上部叶(13~18片)、中部叶(7~12片)和下部叶(1~6片),在105℃下杀青15 min,于65℃烘干至恒重,分别称量干重。

烟株Cd含量采用国标GB 5009.15-2014中干法灰化法,并通过ICP-OES电感耦合等离子原子发射光谱仪测定,分析烟叶各部位Cd的吸收量、分配率、富集系数及转运系数。

1.4 数据处理

采用Excel2010进行数据的基本处理,SPSS22.0统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生物炭对Cd污染土壤pH值的影响

在Cd污染植烟土壤中施加生物炭后,土壤的pH值变化如图1所示。Cd添加量相同时,随生物炭施用量的增加,各处理土壤pH值呈现增加的趋势,其中不施Cd处理的土壤pH值随生物炭施用量的增加增幅最大。处理G0T1和G0T2的土壤pH值分别比处理G0T0升高了0.30和0.61;处理G1T1和G1T2的土壤pH值分别比处理G1T0升高了0.16和0.32;处理G2T2和G2T1分别比处理G2T0升高了0.16和0.38。土壤pH值随Cd施用量的增加而升高,例如处理G0T0、G1T0和G2T0的土壤pH值分别是7.01、7.36、7.43。处理G2T2的土壤pH值最大,为7.81。

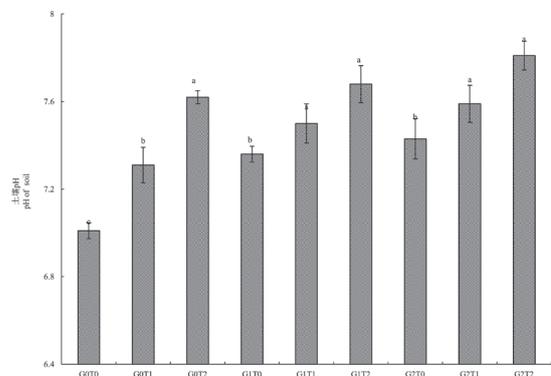


图1 生物炭对Cd污染土壤pH值的影响

Fig.1 Effects of biochar on pH value in Cd contaminated soils

2.2 生物炭对Cd污染土壤中有效态Cd含量的影响

由图2可知,随着外源添加Cd浓度的增加,土壤有效态Cd含量升高,同时土壤有效态Cd含量随

生物炭施用量的增加呈现降低的趋势, 其中处理 G2 较为显著的下降趋势, 处理 G2T1 和处理 G2T2 的土壤有效态 Cd 含量分别是 52.1 mg/kg、38.6 mg/kg, 比处理 G2T0 下降了 15.47% 和 37.39%, 而处理 G1T1 和处理 G1T2 的土壤有效态 Cd 含量分别比处理 G1T0 下降了 9.74% 和 18.86%, 处理 G0T1 和处理 G0T2 的土壤有效态 Cd 含量分别比处理 G0T0 下降了 4.51% 和 7.08%。

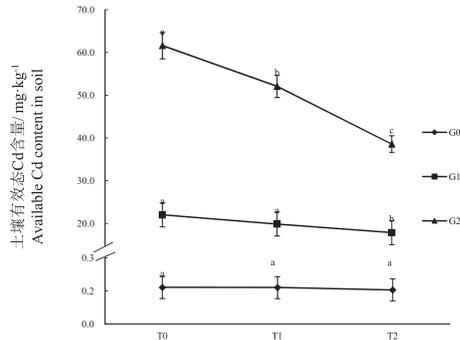


图 2 生物炭对 Cd 污染土壤有效态 Cd 含量的影响

Fig.2 Effects of biochar on available cadmium content in Cd contaminated soils

2.3 生物炭对 Cd 污染土壤中烟株各部位 Cd 含量的影响

生物炭与 Cd 配施后烟株各部位 Cd 含量的变化如表 1。未添加 Cd 的情况下, 烟株叶片 Cd 含量随

生物炭施用量的增加呈现降低的趋势, 处理 G0T1 的上部叶、中部叶、下部叶的 Cd 含量分别比 G0T0 下降了 6.15%、3.45%、25.81%, 处理 G0T2 的上部叶、中部叶、下部叶的 Cd 含量分别比 G0T0 下降了 64.62%、55.17%、36.56%, 而根、茎呈现升高的趋势, 但处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。处理 G0T0 各部位 Cd 含量, 根 > 叶 > 茎, 处理 G0T1 和 G0T2 烟株各部位 Cd 含量根 > 茎 ≥ 下部叶 > 中部叶 > 上部叶, 说明施用生物炭使烟株叶片的 Cd 含量显著降低, 根的 Cd 含量升高。

在外源仅施加 Cd 的情况下, 烟株下部叶的 Cd 含量显著升高, 处理 G1T0 和处理 G2T0 的烟株各部位 Cd 含量表现为下部叶 > 中部叶 > 根 > 上部叶 > 茎, 而当生物炭与 Cd 配施时, 烟株根和茎的 Cd 含量显著升高, 叶片的 Cd 含量显著降低, 处理 G1T2、G2T1 和 G2T2 各部位 Cd 含量, 根 > 下部叶 > 中部叶 > 上部叶。说明在 Cd 胁迫下, 烟株下部叶吸收较多的 Cd, 而随着生物炭施用量的增加, 烟株根部吸收大量的 Cd, 下部叶吸收的 Cd 减少。

由土壤有效态 Cd 与烟株各部位 Cd 含量的相关性分析可知 (表 2), 土壤中有有效态 Cd 含量与烤烟叶片的 Cd 含量呈极显著相关关系, 与根和茎的 Cd 含量呈显著相关关系。

表 1 生物炭对 Cd 污染土壤中烤烟各部位 Cd 含量的影响

Tab.1 Effects of biochar on Cd content in different parts of tobacco in Cd contaminated soils

mg·kg⁻¹

处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf		
			上部叶 Upper leaf	中部叶 Cutters	下部叶 Lower leaf
G0T0	0.96 ± 0.11e	0.56 ± 0.08e	0.65 ± 0.08e	0.58 ± 0.03e	0.93 ± 0.09e
G0T1	1.50 ± 0.15e	0.69 ± 0.12e	0.61 ± 0.10e	0.56 ± 0.08e	0.69 ± 0.11f
G0T2	1.50 ± 0.26e	0.63 ± 0.10e	0.23 ± 0.02f	0.26 ± 0.02f	0.59 ± 0.09f
G1T0	12.38 ± 1.51d	2.10 ± 0.23d	8.18 ± 0.77c	13.55 ± 1.12c	36.46 ± 2.13c
G1T1	16.38 ± 1.54d	2.68 ± 0.31c	7.67 ± 0.54c	9.98 ± 0.49d	31.73 ± 2.85d
G1T2	30.93 ± 2.12c	4.75 ± 0.39c	5.83 ± 0.48d	8.82 ± 0.78d	26.92 ± 1.99d
G2T0	25.56 ± 2.11c	6.08 ± 0.51b	18.89 ± 2.04a	31.73 ± 2.73a	60.30 ± 5.78a
G2T1	67.21 ± 3.40b	12.12 ± 1.38a	14.23 ± 1.57b	19.66 ± 2.01b	49.92 ± 3.11b
G2T2	81.73 ± 5.89a	14.26 ± 1.21a	7.63 ± 1.01c	9.71 ± 1.64d	33.04 ± 3.53c

注: 同列数据后未标有相同小写字母者表示组间差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 下同。

Notes: Letters in same column and same block represented significant differences, small letters were $P < 0.05$, the same below.

表 2 土壤有效态 Cd 与烟株各部位 Cd 含量的相关性分析
Tab.2 Correlation of soil available Cd and Cd content in different parts of tobacco

相关性分析	土壤有效态 Cd Available Cd in soil	根 Root	茎 Stem	上部叶 Upper leaf	中部叶 Cutters	下部叶 Lower leaf
土壤有效态 Cd Available Cd in soil	1	0.698*	0.755*	0.968**	0.939**	0.953**
根 Root		1	0.993**	0.521	0.421	0.588
茎 Stem			1	0.58	0.487	0.626
上部叶 Upper leaf				1	0.989**	0.978**
中部叶 Cutters					1	0.956**
下部叶 Lower leaf						1

注: * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

Notes: The two asterisks represent the significantly correlation on the level of 0.01. The asterisk represent the significantly correlation on the level of 0.05.

2.4 生物炭对 Cd 污染土壤中烟株各部位 Cd 转运系数的影响

转运系数指植株后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值(包括根系到茎、茎到叶以及根系到叶)。烟株各部位对重金属的转运能力差异很大,转运系数越大,表明烟株该部位对重金属的转运能力越强^[17-18]。生物炭对 Cd 污染土壤中重金属在烟株各部位间的转运系数如表 3 所示。对比各部位间的转运系数可知,根到茎的转运系数最小,茎到下部叶的转运系数最大,根到叶和茎到叶的转运系数均随着叶位的升高而降低,说明烟株的茎能将根系的 Cd 直接转运到叶片中,且大量转移至下部叶。在不施加生物炭的情况下,对比处理 G0T0、G1T0 和 G2T0,根-各部位叶的转运系数随外源添加 Cd 浓度的增加呈现升高的趋势。添加等量外源 Cd 的情况下,根和茎向各部位叶的转运系数随生物炭施用量的增加而降低,其中分析“根-上部叶”的转运系数可知,处理 G0T1 和 G0T2 分别比处理 G0T0 低 39.71% 和 77.94%,处理 G1T1 和 G1T2 分别比处理 G1T0 低 28.79% 和 71.21%,处理 G2T1 和处理 G2T2 分别比处理 G2T0 低 71.62% 和 87.84%。“根-茎”转运系数随生物炭施用量的增加有降低的趋势,但各处理之

间差异不显著。说明施加生物炭后,Cd 从根和茎到烟株各部位叶的转运有明显的降低作用。

2.5 生物炭对 Cd 污染土壤中烟株各部位 Cd 富集系数的影响

富集系数是指作物某一部位中某一元素的浓度与土壤中该元素浓度之比,可代表“土壤-作物”体系中元素迁移的难易程度^[19]。富集系数越高,这种元素在“土壤-作物”体系中越易迁移,反之,富集系数越低,这种元素越难以迁移^[20]。烟株各部位对 Cd 的富集系数如表 4 所示,随外源施加 Cd 浓度的增大,烟株各部位对 Cd 的富集系数逐渐降低,烟株叶片对 Cd 的富集系数,处理 G0、G1、G2 分别为 1.48~5.57、0.33~1.66、0.20~0.98。未施加 Cd 的处理 G0,烤烟根系对 Cd 的富集系数最大,下部叶对 Cd 的富集系数与中部叶和上部叶相比最大。对比处理 G0,施加 Cd 的处理 G1 和 G2,根对 Cd 的富集系数大幅下降。施加等量 Cd 的处理,根和茎对 Cd 的富集系数随生物炭施用量的增加而增大,烟株叶片各部位对 Cd 的富集系数随生物炭施用量的增加而降低,处理 G2T2 上部叶对 Cd 的富集系数最小,为 0.20。说明施用生物炭能够降低烟株叶片对 Cd 的富集系数,生物炭减弱了土壤中的 Cd 向叶片迁移的能力。

表 3 生物炭对 Cd 污染土壤中 Cd 在烤烟各部位间转运系数的影响

Tab.3 Effects of biochar on transport coefficients in different parts of tobacco in Cd contaminated soils

处理	根到下部叶	根到中部叶	根到上部叶	根到茎	茎到下部叶	茎到中部叶	茎到上部叶
Treatment	Root to Lower leaf	Root to Cutters	Root to Upper leaf	Root to Stem	Stem to Lower leaf	Stem to Cutters	Stem to Upper leaf
G0T0	0.97±0.06c	0.61±0.08c	0.68±0.09a	0.58±0.07a	1.66±0.21d	1.04±0.09c	1.17±0.09c
G0T1	0.46±0.05d	0.37±0.02d	0.41±0.02b	0.46±0.04b	0.99±0.10e	0.81±0.10d	0.88±0.05d
G0T2	0.39±0.01d	0.17±0.02e	0.15±0.01c	0.42±0.03b	0.93±0.06e	0.41±0.07e	0.36±0.01e
G1T0	2.95±0.35a	1.10±0.20b	0.66±0.07a	0.17±0.01c	17.36±1.16a	6.45±0.43a	3.90±0.18a
G1T1	1.94±0.31b	0.61±0.08c	0.47±0.06b	0.16±0.01c	11.84±0.99b	3.72±0.44b	2.86±0.53b
G1T2	0.87±0.054c	0.29±0.02d	0.19±0.01c	0.15±0.00c	5.67±0.21c	1.86±0.17c	1.23±0.27c
G2T0	2.36±0.19a	1.24±0.22a	0.74±0.05a	0.24±0.01c	9.92±0.32b	5.22±0.31a	3.11±0.23b
G2T1	0.74±0.09c	0.29±0.04d	0.21±0.03c	0.18±0.01c	4.12±0.46c	1.62±0.21c	1.17±0.09c
G2T2	0.40±0.02d	0.12±0.01e	0.09±0.00d	0.17±0.00c	2.32±0.31d	0.68±0.08d	0.54±0.03e

表 4 生物炭对烟株各部位 Cd 的富集系数的影响

Tab.4 Effects of biochar on the enrichment factors of Cd in different parts of tobacco

处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf		
			上部叶 Upper leaf	中部叶 Cutters	下部叶 Lower leaf
G0T0	5.77±0.39b	3.36±0.12b	3.92±0.33a	3.51±0.42a	5.57±0.29a
G0T1	9.05±0.52a	4.18±0.28a	3.68±0.21b	3.38±0.21a	4.16±0.19b
G0T2	9.72±0.78a	4.08±0.55a	1.48±0.21c	1.67±0.13b	3.81±0.32b
G1T0	0.56±0.07f	0.10±0.00e	0.37±0.02d	0.62±0.03c	1.66±0.13c
G1T1	0.82±0.10e	0.13±0.02e	0.39±0.05d	0.50±0.01d	1.60±0.21c
G1T2	1.73±0.11c	0.27±0.01d	0.33±0.05d	0.49±0.03d	1.51±0.22d
G2T0	0.41±0.06f	0.10±0.01e	0.31±0.02e	0.52±0.03d	0.98±0.10e
G2T1	1.29±0.32d	0.23±0.01d	0.27±0.04e	0.38±0.04e	0.96±0.13e
G2T2	2.12±0.17c	0.37±0.02c	0.20±0.01e	0.25±0.02e	0.80±0.09f

3 讨论

3.1 生物炭对 Cd 污染土壤 pH 及土壤有效态 Cd 含量的影响

本试验研究结果表明,随着生物炭施用量的增加,土壤 pH 值升高,与曹莹^[15],王艳红等^[21]研究相似,原因可能是生物炭中含有较多的 Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺等

盐基离子,施入土壤后,可通过吸持作用降低土壤 H⁺ 及交换性 Al³⁺ 水平,降低土壤可交换性酸,进而提升土壤 pH^[22]。研究结果还发现外源添加 Cd 后,土壤 pH 也呈现升高的趋势,可能原因一方面是土壤受到较高浓度 Cd 污染后,土壤微生物代谢受到抑制,导致土壤微生物数量显著下降^[23],使土壤微生物通过分泌有机酸、腐殖酸等与重金属离子结合的沉淀作

用机制^[24]受到抑制,进而使土壤有机酸含量降低,土壤 pH 升高。另一方面烟株受到 Cd 胁迫后,根系受到毒害作用从而改变根系分泌物,间接影响根际环境,使土壤 pH 升高,且重金属胁迫条件下植株也可能形成较高的根际 pH 来限制重金属离子进入原生质^[25]。

施用 Cd 的土壤上施用生物炭,土壤有效态 Cd 含量降低,因为土壤中 Cd 的有效性在土壤中的化学形态很大程度上受土壤 pH 值的调节,当土壤 pH 值提高时,土壤胶体负电荷增加, H⁺ 的竞争能力减弱,氢氧根离子浓度增加,镉离子可与氢氧根离子等结合生成难溶的氢氧化物或碳酸盐及磷酸盐,导致 Cd 的有效性大大降低^[26]。对于碱性土壤有效态 Cd 含量下降的另一个重要原因是,生物炭具有很大的比表面积,含有丰富的含氧官能团^[27]和较高的阳离子交换量,且表面呈负电荷状态^[28],能增加土壤对重金属离子的静电吸附量,含氧官能团与重金属形成稳定的金属络合物,促进污染土壤中的 Cd 由活性较高的可交换态向活性低的残渣态转化,从而降低 Cd 的活性和迁移性。另外生物炭的较高表面能,有结合重金属离子的强烈倾向,能够较好地钝化土壤中的重金属^[29]。周建斌等^[30]研究发现棉秆炭会吸附和沉淀土壤中的有效态 Cd,使土壤中的有效态 Cd 含量降低。

3.2 生物炭对 Cd 污染土壤中烟株各部位 Cd 富集系数和转移系数的影响

Cd 和生物炭施用量使烟株对 Cd 的吸收效应不同,同一处理的烟株不同部位对 Cd 的吸收效应也不同,因此不同处理烟株对 Cd 的富集转移系数不同。

杨惟薇^[31]研究在 Cd 污染的水稻土中添加蚕沙生物炭和水稻秸秆生物炭显著减少了玉米植株中 Cd 的累积,降低了其生物富集系数,抑制植株根部 Cd 向地上部转运,降低了玉米植株内 Cd 的转运系数。刘阿梅^[32]研究生物炭对丹参的影响,发现添加生物炭后丹参对 Cd 的富集系数显著降低。本研究中外源添加 Cd 的处理 G1 和 G2,烟株对 Cd 的富集系数较小,与赵景龙等^[33]研究结果相似,牛之欣等^[34]研究 4 种植物根部及地上部对 Cd 的富集系数,也发现随 Cd 浓度的增大,作物对 Cd 的富集系数显著降低,尤其是蓖麻地上部富集系数由 4.75 降至 0.45。可能是由于施加大量 Cd 后, Cd 的毒害作用抑制了植物代谢,无法将根部吸收的大量镉离子运输到叶中,并且根有积累 Cd 并阻止 Cd 向地上部运输的机制^[35],从而使烟株叶片的富集系数相对较低。侯艳伟等^[14]研究在矿山周边污染土壤中施用生物炭,油菜对 Cd 的富集系数随生物炭的施用而降低。本研究中,在 Cd 污染

的土壤中,施加生物炭后, Cd 向烤烟叶片中的迁移性显著降低,可能是由于施用生物炭后,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 向作物地上部分运移富集。处理 G1T0 中,茎到下部叶的转运系数为 17.36,是处理 G0T0 的 10.46 倍,而处理 G1T1 和处理 G1T2 中,茎到下部叶的转运系数分别为 11.84、5.67,是处理 G0T0 的 7.13 倍和 3.42 倍。施加生物炭后, Cd 在烟株根系的富集系数升高,在叶片的富集系数降低,说明施用生物炭后,土壤有效态 Cd 含量降低,烟株根系和地上部的 Cd 含量大幅度降低,从而使烟株根系对 Cd 的富集能力增强,叶片对 Cd 的富集能力减弱。

4 结论

(1) 随生物炭施用量的增加,土壤 pH 值升高;在添加外源 Cd 的土壤中,土壤有效态 Cd 含量随生物炭施用量的增加大幅下降。

(2) 随生物炭施用量的增加,烤烟根和茎中 Cd 含量大幅增加,中部叶和下部叶 Cd 含量降低。

(3) 生物炭可以减弱烤烟对土壤中 Cd 的迁移能力,降低烤烟对 Cd 的富集性。烤烟“根-各部位” Cd 转移系数和烤烟各部位叶的富集系数随生物炭施用量增加而降低。

因此,可以通过在 Cd 污染的土壤中施用生物炭,降低土壤有效态 Cd 含量,从而降低烤烟可吸食部分烟叶的 Cd 含量,提高卷烟吸食安全性。

参考文献

- [1] 王凯荣,曲伟,刘文龙,等.镉对花生苗期的毒害效应及其品种间差异[J].生态环境学报,2010,19(7):1653-1658.
WANG Kairong, QU Wei, LIU Wenlong, et al. Toxic effect of Cd on peanut seedlings and the intra-specific variations[J]. Ecology and environment, 2010, 19(7):1653-1658.
- [2] 张艳玲,周汉平.烟草重金属研究概述[J].烟草科技,2004,(12):20-23.
ZHANG Yanling, ZHOU Hanping. Summary on study of heavy metal elements in tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2004, (12): 20-23.
- [3] 索卫国,胡清源,王芳,等.卷烟烟气中微量和痕量元素研究综述[J].中国烟草学报,2007,13(5):61-64.
SUO Weiguo, HU Qingyuan, WANG Fang, et al. A review on the determination of trace elements in cigarette smoke[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2007, 13(5): 61-64.
- [4] 郝秀珍,周东美.金属尾矿砂的改良和植被重建研究进展[J].土壤,2005,37(1):13-19.
HAO Xiuzhen, ZHOU Dongmei. Remediation and revegetation of metal mine tailings dumping sites[J]. Soils, 2005, 37(1): 13-19.
- [5] 吴双桃.镉污染土壤治理的研究进展[J].广东化工,2005,32(4):

- 40-41.
WU Shuangtao. The latest development about the remedy of Cd contaminated soil[J]. Guangdong Chemical Industry, 2005, 32(4): 40-41.
- [6] 易建春, 汪模辉, 李锡坤. 土壤中镉的污染及治理 [J]. 广东微量元素科学, 2006, 13(9): 11-15.
YI Jianchun, WANG Mohui, LI Xikun. The pollution and treatment of cadmium in soil[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2006, 13(9): 11-15.
- [7] 李明德, 童潜明, 汤海涛, 等. 海泡石对镉污染土壤改良效果的研究 [J]. 土壤肥料, 2005(1): 42-44.
LI Mingde, TONG Qianming, TANG Haitang, et al. Study on the amelioration effect of meerschaum in Cd contaminated soil[J]. Soils and Fertilizers, 2005(1): 42-44.
- [8] 朱晴, 罗惠莉, 吴根义, 等. 改性赤泥沸石修复材料对土壤中镉的稳定化研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 907-912.
ZHU Qing, LUO Huili, WU Genyi, et al. Stabilization of cadmium in soil using modified red mud-zeolite composite material[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(5): 907-912.
- [9] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. Nature, 2006(7103):624-626.
- [10] 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.
LIU Yuxue, LIU Wei, WU Weixiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 977-982.
- [11] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1411-1421.
LI Li, LIU Ya, LU Yuchao, et al. Review on environmental effects and applications of biochar[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [12] 毕丽君, 侯艳伟, 池海峰, 等. 生物炭输入对碳酸钙调控油菜生长及重金属富集的影响 [J]. 环境化学, 2014, 33(8): 1334-1341.
BI Lijun, HOU Yanwei, CHI Haifeng, et al. Effect of biochar input on the regulation of calcium carbonate application to rape growth and heavy metal accumulation in contaminated soil[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(8): 1334-1341.
- [13] 陈坦, 韩融, 王洪涛, 等. 污泥基生物炭对重金属的吸附作用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54(8): 1062-1067.
CHEN Tan, HAN Rong, WANG Hongtao, et al. Adsorption of heavy metal sby biochar derived from municipal sewages ludge[J]. TsinghuaUniv(Sci& Technol), 2014, 54(8): 1062-1067.
- [14] 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 Yanwei, CHI Haifeng, BI Lijun. Effects of biochar application on growth and typical metal accumulation of rape in mining contaminated soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(6): 1057-1063.
- [15] 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 Jiamei, SHEN Dan, et al. Effects of Biochar on Soil Cadmium Forms and Cadmium Accumulation in Peanut Kernels[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(4): 688-693.
- [16] 叶协锋, 李志鹏, 于晓娜, 等. 生物炭用量对植烟土壤碳库及烤后烟叶质量的影响 [J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5): 33-41.
YE Xiefeng, LI Zhipeng, YU Xiaona, et al. Effect of biochar application rate on quality of flue-cured tobacco leaves and carbon pool in tobacco growing soil[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2015, 21(5): 33-41.
- [17] 张娟. 镉胁迫条件下蕹菜对土壤铁锰铜锌钙镁的吸收与富集 [D]. 福建农林大学, 2011.
ZHANG Juan. The uptake and accumulation of Fe, Mn, Cu, Zn, Ca and Mg by water spinach(Lpomoea aquatica Forsk.)from soils under cadmium stress[D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [18] 李庚飞. 某矿区附近不同作物对 3 种重金属富集能力的研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(26): 257-261.
LI Gengfei. Study on the Concentration Capacity to Three Kinds of Heavy Metals for Different Crops Around the Gold Area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(26): 257-261.
- [19] 朱维, 刘丽, 吴燕明, 等. 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4277-4282.
ZHU Wei, LIU Li, WU Yanming, et al. In-situ Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4277-4282.
- [20] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P, et al. A novels strategy for theremoval of toxic metals from the environment using plants[J]. Biotechnology, 1995(13): 468-478.
- [21] 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]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 207-214.
WANG Yanhong, LI Mengjun, TANG Mingdeng, 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.
- [22] 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.
- [23] Fließbach A, Martens R, Reber H H. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26(9): 1201-1205.
- [24] 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展 [J]. 生态学报, 2015, 35(20):6881-6890.
LI Yunshi, FENG Chongling, WU Xiaofu, et al. A review on the functions of microorganisms in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6881-6890.
- [25] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 重金属污染土壤的植物-微生物联合修复研究进展 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2366-2373.
NIU Zhixin, SUN Lina, SUN Tieheng. Plant-microorganism combined remdiation of heavy metals-contaminated soils: Its research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2366-2373.
- [26] Singh B R, Kristen M. Cadmium uptake by barley as affected by Cd sources and pH levels[J]. Geoderma, 1998, 84: 185-194.
- [27] 叶协锋, 于晓娜, 孟琦, 等. 烤烟秸秆炭化后理化特性分析 [J]. 烟草科技, 2015, 48(5): 14-18.
YE Xiefeng, YU Xiaona, MENG Qi, et al. Analysis of Physical and Chemical Properties of Carbonized Tobacco Stalks[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(5): 14-18.
- [28] 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): 251-256.
GAO Ruili, ZHU Jun, TANG Fan, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 251-256.

- [29] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳吸附汞砷铅镉离子的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):770-774.
WU Cheng, ZHANG Xiaoli, LI guanbin. Sorption of Hg^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} and Cd^{2+} by Black Carbon[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(2):770-774.
- [30] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果 [J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1857-1860.
ZHOU Jianbin, DENG Congjing, CHEN Jinlin, et al. Remediation effects of cotton stalk carbon on Cadmium(Cd)contaminated soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 1857-1860.
- [31] 杨惟薇. 生物炭对镉污染土壤的修复研究 [D]. 广西大学, 2014.
YANG Weiwei. Immobilization and remediation of cadmium contaminated soil with biochars[D]. Guangxi University, 2014.
- [32] 刘阿梅. 生物炭对植物生长发育及镉吸收的影响 [D]. 湖南科技大学, 2014.
LIU Amei. Effects of Biochar on Plant Growth and Uptake of Heavy Metal Cadmium[D]. Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [33] 赵景龙, 张帆, 万雪琴, 等. 早开堇菜对镉污染的耐性及其富集特征 [J]. 草业科学, 2016, 33(1): 54-60.
ZHAO Jinglong, ZHANG Fan, WAN Xueqin, et al. Cadmium tolerance and enrichment characteristics of *Viola prionantha*[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(1): 54-60.
- [34] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 261-268.
NIU Zhixin, SUN Lina, SUN Tieheng, et al. Enrichment characteristics of Cd and Pb by four kinds of plant under hydroponic culture[J]. Chinese journal of ecology, 2010, 29(2):261-268.
- [35] 王浩浩. 烤烟品种对镉的吸收累积敏感性差异研究 [D]. 中国农业科学院, 2013.
WANG Haohao. Research on the difference in sensibility of Cadmium absorption and accumulation of Flue-cured tobacco varieties[D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2013.

Effects of biochar on Cd absorption and transporting enrichment characteristics of tobacco grown in weak alkaline soil

YE Xiefeng^{1*}, ZHOU Hanjun¹, YU Xiaona¹, ZHANG Xiaofan¹, FU Zhongyi¹, MA Jing¹, QIN Yihe¹, HAN Qiuqing¹, XU Min²
¹ College of Tobacco Science, Henan Agricultural University/National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Centre/Key Laboratory for Tobacco Cultivation of Tobacco Industry, Zhengzhou 450002, China;
² Henan Provincial Tobacco Corporation, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Effects of Cd absorption and enrichment on flue-cured tobacco were studied to clarify the restoration of biochar on Cd contaminated soil and reduction of cadmium content in tobacco. Experiment was carried out in 2015 with pot plants (25kg per pot of soil) in selected weak alkaline soil in Central Henan Province. The added exogenous Cd concentrations were 0mg/kg (G0), 50 mg/kg (G1), 100 mg/kg (G2), and the biochar concentrations were 0g/pot (T0), 300g/pot (T1), 600g/pot (T2). A total of nine treatments were used for the two-factor test, which were G0T0, G0T1, G0T2, G1T0, G1T1, G1T2, G2T0, G2T1, G2T2. Soil pH value and soil available Cd content was investigated. Cd content in different parts of tobacco plant, Cd transport and enrichment coefficient were analyzed. Results showed that (1) pH value of soil increased with increased amount of biochar, soil pH value of G2T2 was 7.81, and available soil Cd content decreased with the increase of biochar application. (2) Cd content in soil and tobacco leaf showed very significant positive correlation, and biochar could regulate Cd content in different parts of tobacco at the same level of pollution. (3) The enrichment coefficient of Cd decreased. With the application of biochar, transporting coefficient of cadmium and enrichment coefficient of Cd in leaves decreased. It was concluded that appropriate application of biochar in Cd contaminated soil could reduce content of available Cd of soil and reduce content of cadmium in flue-cured tobacco leaves.

Keywords: Tobacco; Biochar; Cd; Absorption; Transporting and enrichment

Citation: YE Xiefeng, ZHOU Hanjun, YU Xiaona, et al. Effects of biochar on Cd absorption and transporting enrichment characteristics of tobacco grown in weak alkaline soil [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(5)

*Corresponding author. Email: yexiefeng@163.com