

赵建, 朱文彬, 汪玉, 等. 添加生物质炭改良剂对土壤-烟草中重金属含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 664-672.

ZHAO Jian, ZHU Wen-bin, WANG Yu, et al. Effects of biochar amendments on heavy metal content in soil-tobacco system[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 664-672.

添加生物质炭改良剂对土壤-烟草中重金属含量的影响

赵建¹, 朱文彬², 汪玉², 祝乾湘¹, 彭玉龙¹, 刘京¹, 韩小斌¹, 夏志林^{1*}, 王慎强^{2*}

(1. 贵州省烟草公司遵义市公司, 遵义 563000; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:以贵州省遵义市务川县涪洋镇前进村科技园和湄潭县茅坪镇烤烟区土壤、烟叶为研究对象,选择生物质炭和生物质炭基肥作为改良剂,探究其对不同部位烟叶及对应土壤中As、Cd、Cr、Pb的削减效果。试验设置生物质炭(6000 kg·hm⁻²)和生物质炭基肥处理(6000 kg·hm⁻²),以常规施肥处理为对照,分析添加生物质炭和生物质炭基肥对植烟土壤中重金属含量的影响。结果表明,与对照处理相比,生物质炭处理显著降低两试验点烟地土壤中As(务川:15.21%~31.71%;湄潭:13.9%~25.3%) and Pb(务川:15.37%~33.33%;湄潭:9.83%~20.7%)含量($P<0.05$),而对务川土壤中Cd含量及湄潭土壤中Cr含量无显著削减效果;同时显著降低两试验点烟叶中As(务川:中部和上部叶未检出;湄潭:中部和上部叶未检出)、Cd(务川:32.5%~41.2%;湄潭:64.0%~73.2%)、Cr(务川:8.33%~50.4%;湄潭:25.6%~62.5%) and Pb(务川:10.1%~69.8%;湄潭:19.6%~83.5%)含量($P<0.05$)。生物质炭基肥处理显著降低务川试验点烟地土壤中As(11.5%~24.2%)、Cd(10.0%~33.3%)、Cr(11.0%~26.4%) and Pb(4.21%~26.1%)含量($P<0.05$),但对湄潭试验点烟地土壤中Cd含量影响并不显著;对务川试验点烟叶中Cd和Cr含量以及湄潭试验点烟叶中Pb含量无显著影响。各重金属元素主要累积在下部叶中,而上部叶累积较少。综上所述,添加生物质炭和生物质炭基肥能够显著降低两试验点土壤中As和Pb含量;生物质炭处理同时能够显著降低两试验点对应烟叶中As、Cd、Cr和Pb含量,且效果优于生物质炭基肥。

关键词:重金属;烟叶;土壤;改良剂;削减

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0664-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0129

Effects of biochar amendments on heavy metal content in soil-tobacco system

ZHAO Jian¹, ZHU Wen-bin², WANG Yu², ZHU Qian-xiang¹, PENG Yu-long¹, LIU Jing¹, HAN Xiao-bin¹, XIA Zhi-lin^{1*}, WANG Shen-qiang^{2*}

(1. Zunyi Branch Company of Guizhou Tobacco Company, Zunyi 563000, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Field experiment was conducted at the experimental site of the flue-cured tobacco area of Wuchuang and Meitan County in Guizhou Province, China to study the effect of two types amendments of biochar and biomass carbon-based fertilizer on the content of As, Cd, Cr, Pb in tobacco and available As, Cd, Cr, Pb in soil. The experiment set biochar treatment (6000 kg·hm⁻²) and biomass carbon-based fertilizer treatment (6000 kg·hm⁻²), and use the conventional fertilization treatment as a control to analyze the effects of addition of biochar and biomass carbon-based fertilizer on the content of heavy metal in soil and tobacco. The results showed that compared with the control treatment, the biochar treatment significantly reduced the As (Wuchuan: 15.21%~31.71%; Meitan: 13.9%~25.3%) and Pb (Wuchuan: 15.37%~33.33%; Meitan: 9.83%~20.7%) content in the soil of the two test sites ($P<0.05$), but had no significant reduction effect on the Cd content in the Wuchuan soil and the Cr content in the Meitan soil. At the same time, the contents of As (not detected), Cd (Wuchuan:

收稿日期:2018-05-18 录用日期:2018-09-05

作者简介:赵建(1987—),女,重庆人,博士,研究方向为农业微生物。E-mail:709076562@qq.com

*通信作者:夏志林 E-mail:xz15621555@163.com;王慎强 E-mail:sqwang@issas.ac.cn

基金项目:中国烟草总公司贵州省公司项目(201506)

Project supported: The Project of Guizhou Branch Company of China Tobacco Corporation(201506)

32.5%~41.2%; Meitan: 64.0%~73.2%), Cr(Wuchuan: 8.33%~50.4%; Meitan: 25.6%~62.5%) and Pb(Wuchuan: 10.1%~69.8%; Meitan: 19.6%~83.5%) in the tobacco leaves of the two test sites were significantly reduced ($P<0.05$). Biomass carbon-based fertilizer treatment significantly reduced the contents of As (11.5%~24.2%), Cd (10.0%~33.3%), Cr (11.0%~26.4%) and Pb (4.21%~26.1%) in the soil of the Wuchuan test site ($P<0.05$), but had no significant effect on the Cd content in the soil of the Meitan test site; There was no significant effect on the Cd and Cr contents in the tobacco leaves of Wuchuan and the Pb content in the tobacco leaves of Meitan. And the heavy metal content in the upper leaf was significantly lower than that in the lower leaf. To sum up, the addition of biochar and biomass carbon-based fertilizer could significantly reduce the content of As and Pb in the soil of the two test sites. Biochar treatment could significantly reduce the content of As, Cd, Cr and Pb in the corresponding tobacco leaves, which was better than biomass carbon-based fertilizer.

Keywords: heavy metal; tobacco; soil; amendments; decreasing effect

近年来,随着我国工业化的发展及农业生产方式的改变,植烟区土壤受到不同程度的重金属污染^[1]。土壤为烟草植株提供营养,但也是烟草中重金属元素的主要来源^[2],有研究表明,类金属元素As及Cd、Cr、Pb等重金属元素较易在烟草中富集^[3]。烟草中这些重金属元素可通过烟气进入人体,从而危害人体健康^[4]。因此,针对重金属污染的烟田进行修复非常必要。

目前土壤重金属污染修复技术主要有客土法^[5]、热脱附法^[6]等物理修复技术,淋洗^[7]、稳定/固化^[8]等化学修复技术,利用动物^[9]、植物^[10]和微生物^[11]的生物修复技术,及其相互间组合的联合修复技术^[12],农业生态修复技术应用也较为广泛^[13],而以上技术又存在各自的优缺点。生物质炭为生物质在高温厌氧条件下制备而成,其性状稳定、来源丰富、比表面积大,具有较强的离子交换能力,对重金属有较强的吸附固定效果,因此目前广泛应用于重金属污染土壤修复^[14]。例如,王艳红等^[15]通过盆栽试验研究表明,添加5~25 mg·kg⁻¹稻壳基生物质炭可显著降低生菜地上部和根部对Cd的吸收,并改善土壤养分状况。韩梦杰等^[16]向人工模拟Cu污染土壤中添加花生基生物质炭可显著降低土壤中Cu的有效态含量。Meng等^[17]发现添加3%水稻秸秆混合猪粪为原料制备的生物质炭可显著降低CaCl₂提取态Pb、Cu、Zn和Cd浓度。此外,近年来以生物质炭为载体与肥料混合制成的生物质炭基肥在为作物提供养分的同时,能够利用生物质炭结构、性质等优点发挥其环境及经济效益^[18]。目前生物质炭基肥研究多集中于提高作物产量及肥料利用率等方面,而利用生物质炭基肥进行土壤重金属修复研究较少。

本研究在前期调查工作^[19]的基础上,以遵义市务川县和湄潭县具有代表性的植烟土壤为研究对象,分

析植烟土壤和烟叶中重金属As、Cd、Cr、Pb含量,探究添加生物质炭和生物质炭基肥对烟叶不同生长期植烟土壤及对应烟叶中重金属的削减效果,以期为遵义市植烟区土壤重金属修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选取务川和湄潭具有代表性的烟区污染土壤作为研究对象,建立标准化小区。试验地位于贵州省遵义市务川县浣洋镇前进村科技园(28°28'N, 107°41'E, 海拔670 m)及湄潭县茅坪镇(27°30'N, 107°22'E, 海拔1 097.4 m)。务川和湄潭试验点年均降雨量分别为1284 mm和1137 mm,年均气温分别为15.6℃和14.9℃。

在务川县及湄潭县进行的重金属钝化削减试验分别设置3个处理:生物质炭处理(T1,施加量为6000 kg·hm⁻²);生物质炭基肥处理(T2,施加量为6000 kg·hm⁻²);传统的常规施肥处理(CK,对照)。各处理小区面积均为667 m²,所有肥料均按当地标准正常施用。供试烟草品种为NC55。供试生物质炭为水稻秸秆于高温炉中500℃烧制而成,其主要理化性质^[20]:pH 9.16,阳离子交换量为18.9 cmol·L⁻¹,总有机碳和氮含量分别为620 g·kg⁻¹和13.3 g·kg⁻¹,灰分为276 g·kg⁻¹,采用Mehlich III试剂浸提的Ca、P、K、Na、Mg、Fe、Mn、Cu和Zn元素含量分别为2.63、1.06、18.43、3.94、1.41、0.01、0.55、0.001 6 g·kg⁻¹和0.05 g·kg⁻¹。供试生物质炭基肥采购于浙江禾绿丰肥料科技有限公司,N+P₂O₅+K₂O≥20%,有机质≥45%。

1.2 样品采集

供试土壤和植株为2017年烟叶不同成熟期的土壤和烟叶样品,均为对等采样。务川县和湄潭县两试验点下部叶及下部叶对应土样分别于2017年7月4

日和2017年7月7日采集,中部叶及中部叶对应土样分别于2017年7月29日和2017年8月1日采集,上部叶及上部叶对应土样分别于2017年8月19日和2017年8月21日采集。

土壤样品采自0~20 cm耕层土,每个处理对应每个部位烟叶各采集5片烟叶,与小区内同时分散采集3个平行样品作为同一处理下的3个重复。不同部位烟叶及其对应土壤样品的采集时间均按照当地植烟常规采收期进行。施肥前在小区内按照非系统布点法(S型)随机取5点,采集0~20 cm耕层土壤,土壤样品风干、研磨,过0.841 mm和0.149 mm孔径筛,测定其基本理化性质(表1)及重金属As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn含量(表2),测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[21]。

1.3 样品分析

土壤样品采用HNO₃:HCl:HF=9 mL:3 mL:1 mL消解,烟叶样品采用HNO₃ 9 mL微波消解(Ethos ONE),土壤和烟叶中As、Cd、Cr、Pb含量采用ICP-MS(Agilent 7700x)测定。

1.4 数据处理

采用Origin 8.5进行数据绘图,SPSS 16.0软件对不同试验数据进行统计分析。采用LSD和Duncan分析法检验处理间差异的显著性($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 改良剂对务川县土壤As、Cd、Cr、Pb的削减作用

添加生物质炭和生物质炭基肥处理对务川县烟地试验区土壤中重金属含量影响如图1所示。参照土壤环境质量二级标准^[22](As 40 mg·kg⁻¹, Cd 0.3 mg·

kg⁻¹, Cr 150 mg·kg⁻¹, Pb 250 mg·kg⁻¹), 务川县试验点烟地对照处理土壤中超标重金属为As和Cd,其中下部叶对应土壤中As含量为标准限值的5.2倍,Cd含量为标准限值的1.1倍;中部叶对应土壤中As含量为标准限值的1.7倍;上部叶对应土壤中As含量为标准限值的1.2倍。

相较于对照处理,添加生物质炭和生物质炭基肥处理对下部叶、中部叶和上部叶对应土壤中重金属As、Cd、Cr和Pb含量均有不同程度削减效果。添加生物质炭处理中As含量分别降低15.21%、31.71%和25.12%;Cd含量分别降低6.25%、13.33%和8.33%;Cr含量分别降低26.75%、26.53%和24.04%;Pb含量分别降低15.04%、10.43%和25.75%。添加生物质炭基肥处理中As含量分别降低21.01%、39.25%和39.92%;Cd含量分别降低6.25%、20.00%和33.33%;Cr含量分别降低25.46%、23.13%和22.26%;Pb含量分别降低22.84%、15.37%和18.79%。相对于对照处理,两种处理均显著降低了As、Cr和Pb的含量($P<0.05$);与对照处理相比,生物质炭基肥处理仅显著降低上部叶对应土样中Cd含量,而生物质炭处理与其无显著差异。

2.2 改良剂对湄潭县土壤As、Cd、Cr、Pb的削减作用

添加生物质炭和生物质炭基肥处理对湄潭县烟地试验区土壤中重金属含量影响如图2所示。参照土壤环境质量二级标准^[22],湄潭县烟地试验区对照处理土壤中超标重金属元素为As,其中下部叶对应土壤中As含量为标准限值的3.0倍;中部叶对应土壤中As含量为标准限值的1.7倍;上部叶对应土壤中As含量为标准限值的1.3倍。

表1 供试土壤的基本理化性质

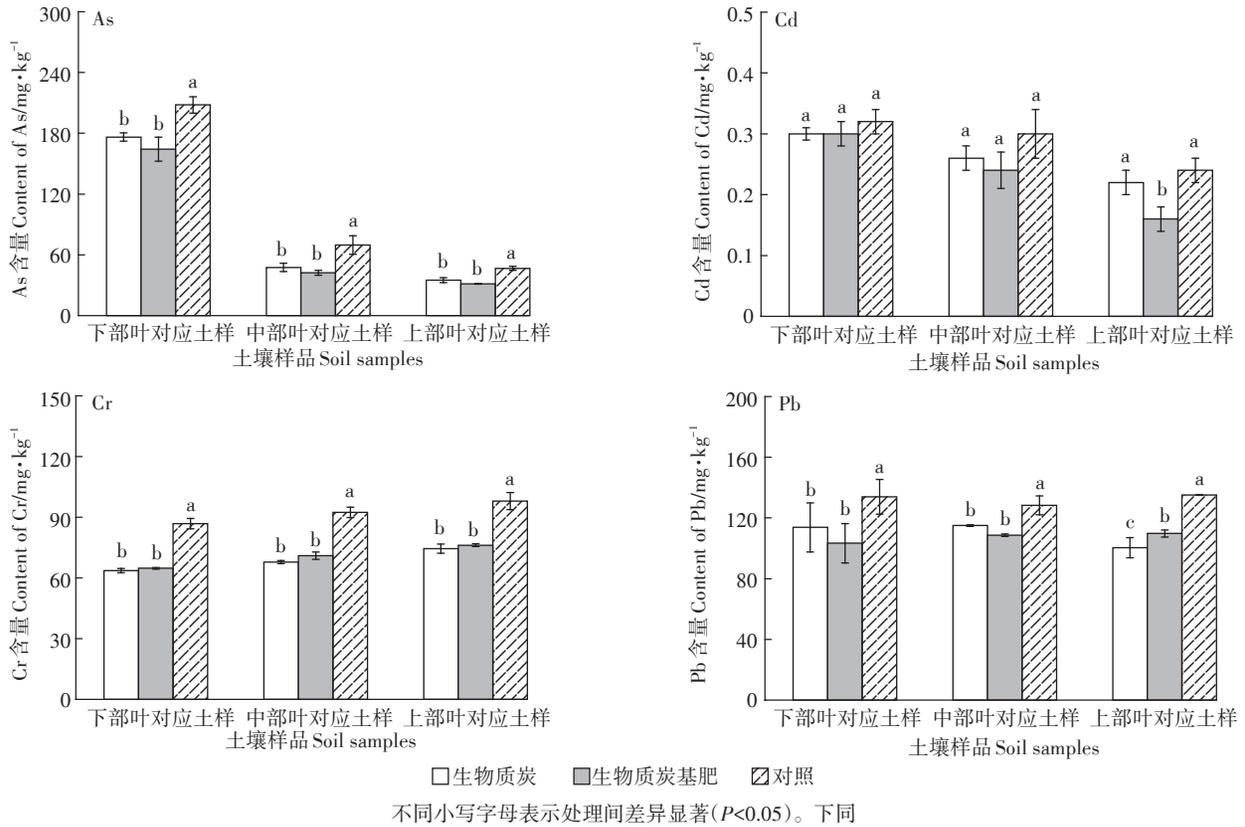
Table 1 Physical and chemical property of the experimental soil

土壤样品 Soil samples	pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkalyzable nitrogen/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Olsen-P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹
务川土样	5.88	40.61±1.87	2.57±0.21	0.73±0.01	13.26±0.76	224.20±15.59	15.34±4.32	106.3±1.77
湄潭土样	7.19	29.17±1.51	1.81±0.10	0.75±0.04	10.67±0.59	176.40±41.60	22.26±1.87	182.5±7.07

表2 供试土壤的重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Heavy metal content of the experimental soil(mg·kg⁻¹)

土壤样品 Soil samples	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
务川土样	53.87±7.48	2.17±0.06	93.72±10.44	35.91±2.86	87.76±6.39	66.78±2.35
湄潭土样	49.33±6.28	1.67±0.04	88.96±1.63	31.31±1.07	62.22±0.81	51.62±0.40



The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 两种改良剂对务川县土壤重金属的削减效果

Figure 1 Effects of two amendments on soil heavy metal content in Wuchuan County

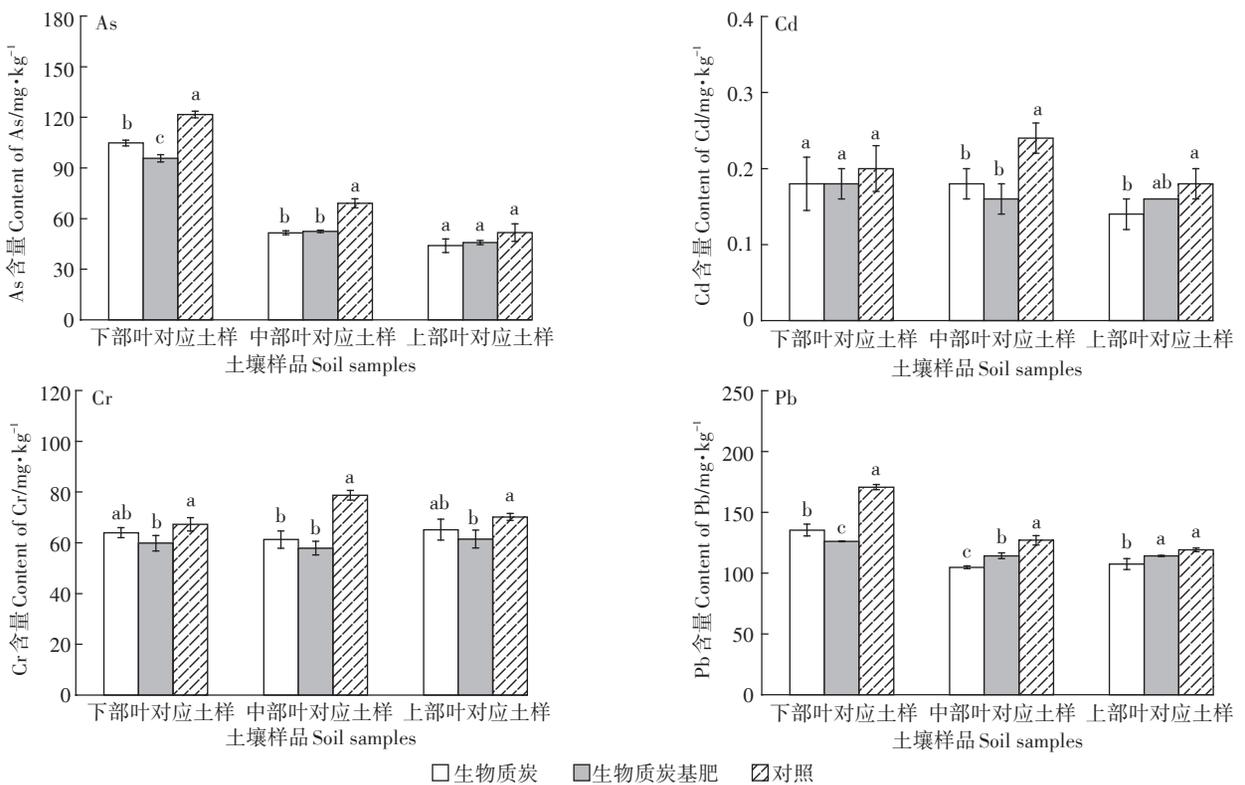


图2 两种改良剂对涪潭县土壤重金属的削减效果

Figure 2 Effects of two amendments on soil heavy metal content in Meitan County

相对于对照处理,添加生物质炭和生物质炭基肥处理对下部叶、中部叶和上部叶所对应土壤中重金属As、Cd、Cr和Pb含量均有不同程度削减。添加生物质炭处理中As含量分别降低13.9%、25.3%和15.0%;Cd含量分别降低10.0%、25.0%和22.2%;Cr含量分别降低4.90%、22.1%和7.15%;Pb含量分别降低20.7%、17.5%和9.83%。添加生物质炭基肥处理中As含量分别降低21.3%、24.2%和11.5%;Cd含量分别降低10.0%、33.3%和11.1%;Cr含量分别降低11.0%、26.4%和12.4%;Pb含量分别降低26.1%、10.6%和4.21%。相较于对照处理,生物质炭处理显著降低下部叶对应土样中As和Pb含量、中部叶对应土样中As、Cd、Cr和Pb含量及上部叶对应土样中Cd和Pb含量($P<0.05$);生物质炭基肥处理显著降低下部叶及中部叶对应土壤中As、Cr和Pb含量,以及上部叶对应土壤中Cr含量($P<0.05$)。

2.3 改良剂对务川县烟叶As、Cd、Cr、Pb的削减作用

添加生物质炭和生物质炭基肥处理对务川县烟地试验区不同部位烟叶中重金属含量影响如图3所示。相对于对照处理,添加生物质炭和生物质炭基肥处理对下部叶、中部叶和上部叶中重金属As、Cd、Cr和Pb含量均有不同程度的削减效果。添加生物质炭处

理的下部烟叶中As含量降低56.4%,中部和上部烟叶中均未检出As;Cd含量分别降低35.8%、32.5%和41.2%;Cr含量分别降低50.4%、8.33%和40.5%;Pb含量分别降低10.1%、53.8%和69.8%。相较于对照处理,生物质炭处理显著降低下部及上部叶中As、Cd和Cr含量,以及中部叶中Cd和Pb含量($P<0.05$)。添加生物质炭基肥处理的下部烟叶中As含量降低89.7%,中部和上部烟叶中均未检出As;下部 and 上部烟叶中Cd含量分别降低12.7%和15.0%,而中部烟叶中Cd含量并未降低;下部和上部烟叶中Cr含量分别降低44.4%和24.3%,而中部烟叶中Cr含量并未降低;Pb含量分别降低27.5%、48.0%和76.3%。与对照处理相比,生物质炭基肥处理显著降低下部叶中As、Cr含量,以及中部、上部叶中Pb含量($P<0.05$)。

2.4 改良剂对涪潭县烟叶As、Cd、Cr、Pb的削减作用

添加生物质炭和生物质炭基肥处理对涪潭县烟地试验区烟叶中重金属含量影响如图4所示。相对于对照处理,添加生物质炭及生物质炭基肥处理对下部叶、中部叶和上部叶中重金属As、Cd、Cr和Pb含量均有不同程度的削减效果。添加生物质炭处理的下部烟叶中As含量降低37.93%,在中部和上部烟叶中未检出As;Cd含量分别降低72.19%、75.36%和

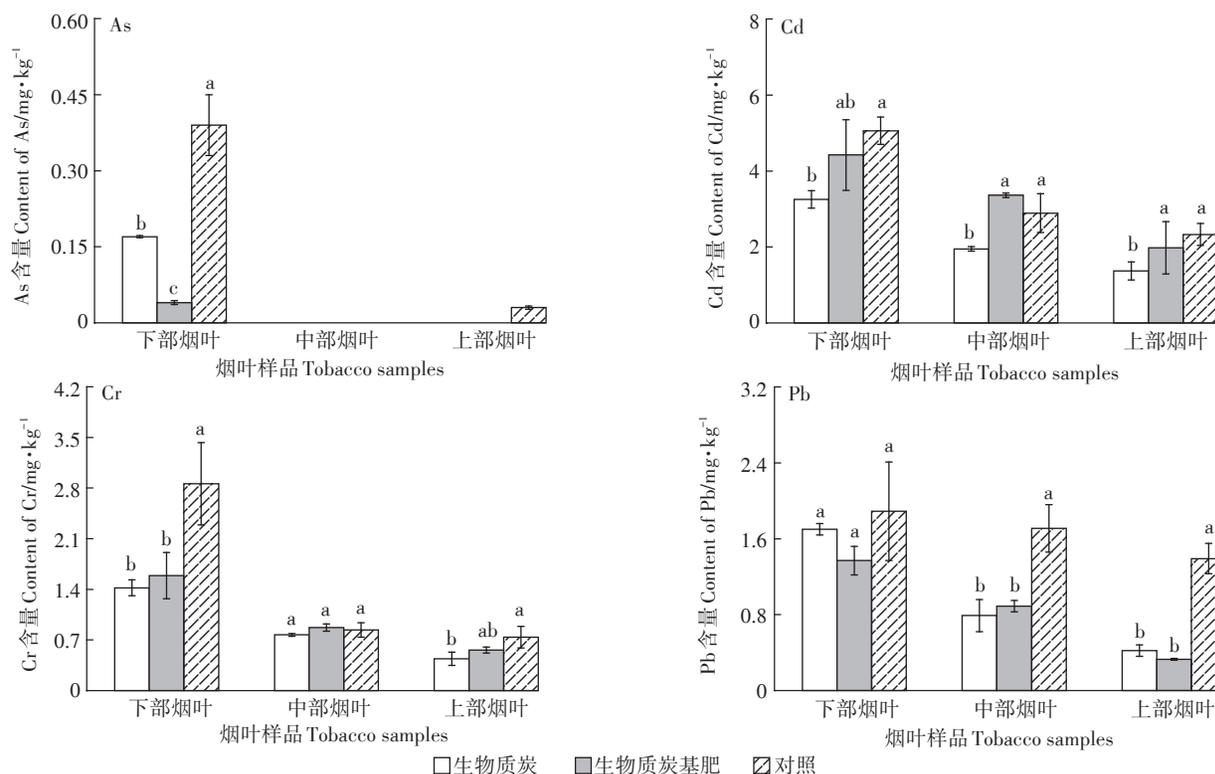


图3 两种改良剂对务川县烟叶中重金属的削减效果

Figure 3 Effects of two amendments on heavy metals in tobacco from Wuchuan County

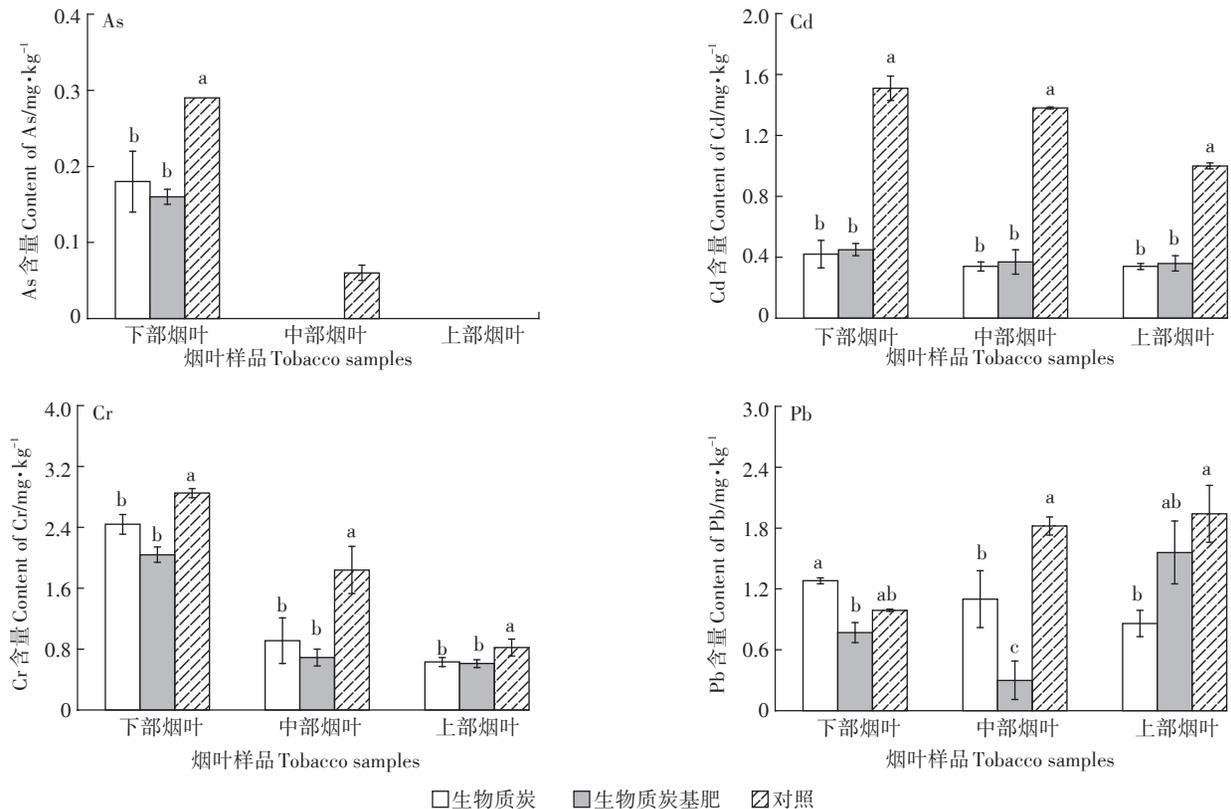


图4 两种改良剂对涪潭县烟叶中重金属的削减效果

Figure 4 Effects of two amendments on heavy metals in tobacco from Meitan County

66.00%;Cr含量分别降低14.39%、50.54%和23.17%;中部和上部烟叶中Pb含量分别降低39.56%和55.67%,下部烟叶中Pb含量并未降低。与对照处理相比,生物炭处理显著降低下部叶中As、Cd和Cr含量,中部叶中As、Cd、Cr和Pb含量,以及上部叶中Cd、Cr和Pb含量($P<0.05$)。添加生物炭基肥处理的下部烟叶中As含量降低44.83%,在中部和上部烟叶中未检出As;Cd含量分别降低70.20%、73.19%和64.00%;Cr含量分别降低28.42%、62.50%和25.61%;Pb含量分别降低22.22%、83.52%和19.59%。与对照处理相比,生物炭基肥处理显著降低下部叶中As、Cd、Cr和Pb含量、中部叶中As、Cd、Cr和Pb含量,以及上部叶中Cd和Cr含量($P<0.05$)。

3 讨论

本文选取遵义市务川县和涪潭县具有代表性的烟区污染土壤开展重金属削减试验,结果表明添加生物炭和生物炭基肥对务川县和涪潭县试验点烟地土壤和烟叶中As、Cd、Cr和Pb含量均有不同的削减效果。生物炭处理显著降低两试验点烟地土壤中As和Pb含量,而对务川土壤中Cd含量及涪潭土壤

中Cr含量并无显著削减效果;同时显著降低两试验点烟叶中As、Cd、Cr和Pb含量。生物炭基肥处理显著降低务川试验点烟地土壤中As、Cd、Cr和Pb含量,但对涪潭试验点烟地土壤中Cd含量影响不显著;对务川试验点烟叶中Cd和Cr含量以及涪潭试验点烟叶中Pb含量也无显著影响。这种差异主要与试验地土壤pH、有机质含量及重金属含量等因素有关。务川县试验点烟地土壤偏酸性,有机质含量较高,施加生物炭及生物炭基肥,可在一定程度上提高土壤pH,有利于对土壤中重金属的吸附固定;涪潭县试验点烟地土壤偏碱性,有机质含量相对较低,对Cd、Cr等重金属削减效果较差;加之务川试验点烟地土壤中各重金属含量均高于涪潭试验点,因此改良剂对两地重金属的削减效果差异明显。类似结果的研究亦有所报道。陈德^[23]研究生物炭对土壤重金属生物有效性影响的结果表明,添加生物炭对酸性土壤($pH<6.5$)中As和Pb的降幅较高,同时有机质含量较高($>30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤更有利于重金属的固定。Sauve等^[24]认为土壤Cd、Pb、Zn等重金属化学迁移性与土壤pH、有机质含量以及土壤重金属含量有显著相关性,相同土壤环境下不同重金属元素的有效性亦

有所差异。张良运等^[25]对南方典型大米中Cd、Zn、Se含量变异的研究结果表明,产地土壤环境对水稻Cd吸收的影响远高于Zn。

除此以外,添加不同改良剂对烟叶中重金属含量亦有重要影响。生物质炭处理的务川和湄潭试验点烟叶中As、Cd、Cr和Pb含量均显著降低,而生物质炭基肥处理对务川试验点烟叶中Cd和Cr含量及湄潭试验点烟叶中Pb含量均无显著影响。这是由于生物质炭孔隙结构发达、比表面积较大,且具有较强的离子交换能力^[26],施入土壤后,可改善土壤理化性状,同时固定土壤重金属元素^[27-28]。例如倪群丽^[29]对生物质炭钝化修复Pb/As复合污染土壤中重金属的研究结果表明,以猪粪和鸡粪作为原材料的生物质炭可分别通过化学沉淀和表面吸附沉淀固定土壤重金属Pb,但对As的吸附效果较差。亦有研究表明,添加生物质炭可有效降低土壤中As、Cd、Cr和Pb等重金属含量,且添加5%生物质炭对土壤重金属的吸附效果最好^[30]。生物质炭基肥是生物质炭与肥料混合而成,在利用生物质炭进行吸附固定的同时,重金属离子也可与肥料中可溶性磷酸盐或碳酸盐结合形成沉淀^[31]。Cao等^[32]研究发现,以牛粪为原料,分别在200℃和350℃制备的生物质炭中富含磷酸盐和碳酸盐,且可分别与Pb形成 $Pb_9(PO_4)_6$ 和 $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ 沉淀。刘冲等^[33]通过生物质炭和炭基肥影响油麦菜吸收重金属的研究结果亦表明,添加稻秆炭和炭基肥均可显著降低油麦菜可食部位对Cd、Cu、Pb和Zn的吸收。但本试验中相较于生物质炭处理,生物质炭基肥对烟叶中部分重金属的削减效果较差,可能是因湄潭县试验点烟地土壤中重金属含量较低,加之炭基肥中的生物质炭与肥料结合后,生物质炭的比表面积降低,从而减少重金属的吸附位点,一定程度上限制对重金属的吸附效果。

本试验结果中务川试验点As、Cd、Cr和Pb在烟叶中累积量的顺序为下部叶>中部叶>上部叶,湄潭试验点As、Cd和Cr亦有此规律,但Pb含量并无显著规律。重金属元素较易在烟叶中富集,富集能力大小顺序为Cd>Pb>Hg>As>Cr,且富集的重金属主要通过抑制烟叶叶绿素的合成,降低烟叶叶绿素含量,从而影响烟叶生长和品质^[34]。王绍坤等^[35]对土壤重金属在烟叶中分布及累积特征的研究结果表明,As、Cr、Cu和Pb在烟叶中残留量的顺序为下部叶>中部叶>上部叶;而Cd的残留量顺序为上部叶>中部叶>下部叶。贺远等^[36]的研究结果亦表明Cd在烟草中的累积

分布依次为下部叶>中部叶>上部叶。烟草中重金属的累积量取决于土壤重金属有效态含量而非总量。添加生物质炭和生物质炭基肥后,相较于对照处理,烟叶中各种金属含量均有不同程度的降低,生物质炭在钝化重金属、降低重金属生物有效性方面应用广泛^[37]。刘晶晶等^[38]通过生物质炭对土壤重金属转化及其有效性影响的研究结果表明,添加5%的稻草炭可显著降低土壤中Cu、Cd、Pb和Zn的有效态含量。Shen等^[39]的研究结果亦表明,添加清洁生物质炭后,土壤和植物组织中的Pb和Cd含量均显著降低。通过添加生物质炭基肥修复土壤重金属的案例相对较少。尤方芳等^[40]通过对炭基肥削减Cd在烟草中吸收累积的研究结果表明,相较于其他处理,生物质炭与有机无机肥配施可显著降低烟草中Cd含量,且削减效果最好,该结论与本试验结果一致。

4 结论

本文以务川和湄潭两试验点烟地土壤和烟叶为研究对象,探究生物质炭和生物质炭基肥两种改良剂对不同部位烟叶及对应土壤中的As、Cd、Cr和Pb含量削减效果,结果表明,添加生物质炭和生物质炭基肥能够显著降低两试验点土壤中As和Pb含量;生物质炭处理同时能够显著降低两试验点对应烟叶中As、Cd、Cr和Pb含量,效果优于生物质炭基肥。

参考文献:

- [1] 史宏志, 刘国顺, 常思敏, 等. 烟草重金属研究现状及农业减害对策[J]. 中国烟草学报, 2011, 17(3): 89-94.
SHI Hong-zhi, LIU Guo-shun, CHANG Si-min, et al. Research progress on heavy metal in tobacco and agricultural measures of harm reduction[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2011, 17(3): 89-94.
- [2] 招启柏, 朱卫星, 胡钟胜, 等. 改良剂对土壤重金属(Cd、Pb)的固定以及对烤烟生长影响[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(4): 26-32.
ZHAO Qi-bai, ZHU Wei-xing, HU Zhong-sheng, et al. Cadmium and lead immobilization by applying amendments in polluted soils and their effects on tobacco (*Nicotiana tabacum*) growth[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(4): 26-32.
- [3] Fayiga A O, Ma L Q, Cao X, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2): 289-296.
- [4] 陈庆华, 陈玉成. 吸烟过程中的重金属来源解析及预防[J]. 微量元素与健康研究, 2005(5): 47-49.
CHEN Qing-hua, CHEN Yu-cheng. Heavy metals source analyze in smoking and it's reduction strategy[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2005(5): 47-49.
- [5] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34

- (6):130-135.
YANG Hai-lin. Remediation of heavy metal polluted soil[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(6): 130-135.
- [6] Huang Y T, Hseu Z Y, Hsi H C. Influences of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(9): 1244-1249.
- [7] Peng J F, Song Y H, Peng Y, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3): 633-640.
- [8] 郝汉舟, 陈同斌, 靳孟贵, 等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 816-824.
HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, JIN Meng-gui, et al. Recent advance in solidification/stabilization technology for the remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 816-824.
- [9] 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 等. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 78-83.
FU Xiao-yong, QIN Shang, YANG Liu, et al. Effects of earthworm accumulation of heavy metals in soil matrix[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 78-83.
- [10] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13(5): 468-474.
- [11] Farhadian M, Vachelard C, Duchez D, et al. In situ bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater: A review[J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(13): 5296-5308.
- [12] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根相互作用对土壤-植物系统中Cd迁移转化的影响[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 228-234.
CHENG Jie-min, YU Xie-zhi, HUANG Ming-hong. Effect of earthworm-mycorrhiza interaction on transformation of Cd from soil to plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 228-234.
- [13] 王林, 周启星. 农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 772-777.
WANG Lin, ZHOU Qi-xing. Strengthening phytoremediation of heavy metal contaminated soils by agronomic management practices[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 772-777.
- [14] 张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 970-977.
ZHANG Xiao-kai, HE Li-zhi, LU Kou-ping, et al. Use of biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants: A review[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 970-977.
- [15] 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 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.
- [16] 韩梦杰, 荆延德. 花生秸秆生物炭输入对棕壤中铜形态转化及其有效性的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1486-1492.
HAN Meng-jie, JING Yan-de. Effect of peanut straw biochar on copper forms and its bioavailability in brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1486-1492.
- [17] Meng J, Tao M, Wang L, et al. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 300-307.
- [18] 乔志刚, 付嘉英, 郑金伟, 等. 不同炭基肥对青椒生长、品质和氮素农学利用率的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 174-179.
QIAO Zhi-gang, FU Jia-ying, ZHEN Jin-wei, et al. Effects of different biochar fertilizer on growth, quality and agronomic N use efficiency of green pepper[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 174-179.
- [19] 赵建, 李青山, 汪玉, 等. 遵义市植烟区灌溉水和有机肥料中重金属含量调查[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(1): 82-86.
ZHAO Jian, LI Qing-shan, WANG Yu, et al. Investigation of heavy metals in irrigation water and organic fertilizer in tobacco growing areas of Zunyi City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 82-86.
- [20] 何莉莉. 秸秆生物炭对农田土壤硝化和反硝化作用的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
HE Li-li. The effects of rice-straw biochar addition on nitrification and denitrification in agricultural soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2017.
- [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. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准 GB 15168—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 84-86.
State Bureau of Environmental Protection, State Technology Supervision Administration. Environmental quality standard for soils GB 15168—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995: 84-86.
- [23] 陈德. 生物炭对土壤重金属有效性和作物吸收影响的整合分析及田间试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
CHEN De. Effects of biochar on heavy metal availability and crop uptake: Meta-analysis and field study[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [24] Sauve S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1125-1131.
- [25] 张良运, 李恋卿, 潘根兴. 南方典型产地大米Cd、Zn、Se含量变异及其健康风险探讨[J]. *环境科学*, 2009, 30(9): 2792-2797.
ZHANG Liang-yun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Variation of Cd, Zn and Se contents of polished rice and the potential health risk for subsistence-diet farmers from typical areas of south China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2792-2797.
- [26] 赵青青, 陈蕾伊, 史静. 生物炭对重金属土壤环境行为及影响机制研究进展[J]. *环境科学导刊*, 2017, 36(2): 12-18.
ZHAO Qing-qing, CHEN Lei-yi, SHI Jing. Research progress of the mechanism of action of heavy metal in soil environment by biochar[J]. *Environmental Science Survey*, 2017, 36(2): 12-18.
- [27] Ouyang W, Huang W, Hao X, et al. Watershed soil Cd loss after long-

- term agricultural practice and biochar amendment under four rainfall levels[J]. *Water Research*, 2017, 122:692-700.
- [28] 郭 虎. 生物质炭对重金属污染土壤水稻镉吸收的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
- GUO Hu. Effects of biochar application on cadmium accumulation of rice in heavy metal contaminated soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [29] 倪群丽. 生物质炭对铅/砷的固定钝化作用[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- NI Qun-li. Immobilization of lead and arsenic by biochar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [30] Nawab J, Ghani J, Khan S, et al. Minimizing the risk to human health due to the ingestion of arsenic and toxic metals in vegetables by the application of biochar, farmyard manure and peat moss[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 214:172-183.
- [31] 石红蕾, 周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):486-494.
- SHI Hong-lei, ZHOU Qi-xing. Research progresses in the effect of biochar on soil-environmental behaviors of pollutants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2):486-494.
- [32] Cao X D, Ma L N, Gao B, et al. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(9):3285-3291.
- [33] 刘 冲, 刘晓文, 吴文成, 等. 生物炭及炭基肥对油麦菜生长及吸收重金属的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10):3064-3070.
- LIU Chong, LIU Xiao-wen, WU Wen-cheng, et al. Effect of biochar and biochar based fertilizer on growth of *Lactuca sativa* L. and absorption of heavy metals[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10):3064-3070.
- [34] 王晓敏. 贵州植烟区土壤重金属污染状况及其对烟叶安全的影响评价[D]. 贵阳:贵州大学, 2009.
- WANG Xiao-min. The heavy metal pollution in the soil of Guizhou tobacco-growing areas and the evaluation of its impact on the safety of tobacco leaves[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.
- [35] 王绍坤, 程昌新, 罗华元, 等. 土壤重金属处理对烤烟烟叶中 Pb, Cr, Cu, As, Cd 和 Hg 的分布与累积的影响[J]. 烟草科技, 2013(1):39-41.
- WANG Shao-kun, CHENG Chang-xin, LUO Hua-yuan, et al. Accumulation and distribution of Pb, Cr, Cu, As, Cd and Hg in flue-cured tobacco leaves growth in soil treated with six heavy metal solutions[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2013(1):39-41.
- [36] 贺 远, 刘海伟, 石 屹, 等. 镉在烟草中的积累分配及其对烟草生长的影响[J]. 中国烟草科学, 2015, 21(2):99-104.
- HE Yuan, LIU Hai-wei, SHI Qi, et al. Effects of cadmium on the growth of tobacco and the characteristics of cadmium accumulation by tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2015, 21(2):99-104.
- [37] Nie C R, Yang X, Niazi N K, et al. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study[J]. *Chemosphere*, 2018, 200:274-282.
- [38] 刘晶晶, 杨 兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11):3679-3687.
- LIU Jing-jing, YANG Xing, LU Kou-ping, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11):3679-3687.
- [39] Shen X, Huang D Y, Ren X F, et al. Phytoavailability of Cd and Pb in crop straw biochar-amended soil is related to the heavy metal content of both biochar and soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168:245-251.
- [40] 尤方芳, 赵铭钦, 陈发元, 等. 生物炭与不同肥料配施对镉胁迫下烟株生长的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(3):489-495.
- YOU Fang-fang, ZHAO Ming-qin, CHEN Fa-yuan, et al. Effect of combined application of biochar and fertilizer on growth of tobacco under Cd stress[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(3):489-495.