

李衍亮, 黄玉芬, 魏 岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2233–2239.

LI Yan-liang, HUANG Yu-fen, WEI Lan, et al. Impacts of biochar application on amelioration of heavy metal-polluted soil and maize growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2233–2239.

施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响

李衍亮^{1,2,3}, 黄玉芬^{1,2}, 魏 岚^{1,2}, 黄连喜^{1,2}, 黄 庆^{1,2}, 许桂芝^{1,2}, 刘忠珍^{1,2*}

(1.广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640; 2.农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省农业资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 3.东莞理工学院生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523808)

摘 要: 为了解生物炭的农业环境效应, 采用大田试验, 研究了不同生物炭施用量(0、5、10、20、30 t·hm⁻²)对韶关仁化县矿区周边重金属污染农田土壤理化性质、玉米(粤甜9号)生长状况、产量及重金属累积等的影响。结果表明: 与对照(CK)相比, 生物炭显著提高土壤 pH 值和有机质质量分数, 其提升幅度随施用量的增加而升高, 而土壤阳离子交换量随施用量的增加先升高后降低; 生物炭施加量达到 30 t·hm⁻² 时, 土壤速效钾含量是 CK 处理的 3.1 倍, 但不同生物炭施用量对土壤碱解氮含量的影响没有显著性差异; 不同用量生物炭均能降低土壤 Pb 和 Cd 的含量, 降低幅度分别为 11.3% 和 23.9%。各处理均能有效降低 Pb、Cd 在玉米粒、玉米芯、玉米叶和玉米秆中的累积。当施用量为 20 t·hm⁻² 时, 玉米粒中 Pb 的含量降低幅度达 49.4%, Cd 的降低幅度达 45.4%; 生物炭对玉米的增产效果随施用量的增加而增加, 分别为 CK 的 1.75、6.16、8.84 倍和 8.90 倍。综上所述, 生物炭通过提高土壤 pH 值和有机质含量, 实现了对南方酸性土壤的改良, 对玉米产量具有促进作用, 可降低污染土壤重金属的生物有效性。

关键词: 生物炭; 重金属; 土壤改良; 玉米; 产量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)11-2233-07 doi:10.11654/jaes.2017-0522

Impacts of biochar application on amelioration of heavy metal-polluted soil and maize growth

LI Yan-liang^{1,2,3}, HUANG Yu-fen^{1,2}, WEI Lan^{1,2}, HUANG Lian-xi^{1,2}, HUANG Qing^{1,2}, XU Gui-zhi^{1,2}, LIU Zhong-zhen^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture; Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China; 3. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: In the present study, a field trial was adopted to study the effect of biochar application at different concentrations (0, 5, 10, 20 t·hm⁻² and 30 t·hm⁻²) on the physicochemical properties of the heavy metal-polluted farmland soil near mining areas in Renhua, Shaoguan, China. In addition, we investigated the impacts of biochar on the growth and yield of maize (Yuetian 9) as well as on the accumulation of heavy metals in the crops. The results indicated that the addition of biochar significantly elevated the soil pH and organic matter fractions compared with the CK treatments, and the rate of increase was positively related to the amount of biochar applied. Conversely, the cation exchange capacity of soil first increased and then decreased with an increase in the amount of biochar applied. When the biochar application amount was 30 t·hm⁻², the content of available potassium in soil was approximately 3.1 times of that in the CK treatments; however, the ad-

收稿日期: 2017-04-10 录用日期: 2017-08-10

作者简介: 李衍亮 (1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为污染物环境行为研究与治理。E-mail: lee8338@126.com

* 通信作者: 刘忠珍 E-mail: lzzgz2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571313, 41401353, 41401575); 国家重点研发计划项目 (SQ2017YFNC060046); 广东省科技计划项目 (2014A020216018, 2016A020210034, 2017A020203001, 2017B020203002); 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目 (OGL-201506)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41571313, 41401353, 41401575); The National Key Research and Development Program of China (SQ2017YFNC060046); Department of Science and Technology of Guangdong Province (2014A020216018, 2016A020210034, 2017A020203001, 2017B020203002); The State Key Laboratory of Organic Geochemistry Grant Program (OGL-201506)

dition of different amounts of biochar showed no significant impact on the content of hydrolysable nitrogen in soil. The soil contents of Pb and Cd reduced by 11.3% and 23.9%, respectively, regardless of the application amount of biochar. A significant reduction was observed in the accumulation of Pb and Cd in the grain, cob, leaf, and stalk of maize in all biochar treatments. When the biochar application amount was $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, the contents of Pb and Cd in maize grain decreased by 49.4% and 45.4%, respectively. With the application of 5, 10, 20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ biochar, the maize yields were 1.75, 6.16, 8.84 times and 8.90 times higher than that in CK treatment, respectively, indicating that the maize yields increased with an increase in the amount of biochar applied. Overall, the application of biochar ameliorated the acidified soil in Southern China by increasing its pH and organic matter content, subsequently promoting the yield of maize and reducing the bioavailability of heavy metals in contaminated soils.

Keywords: biochar; heavy metal; soil improvement; maize; yield

我国耕地土壤质量退化明显,土壤环境污染问题日趋严重,南方土壤特别是广东矿区土壤重金属污染尤为突出^[1]。2016年5月31日,国务院发布了《土壤污染防治行动计划》,确定通过十项措施来防治土壤污染,简称“土十条”。迄今为止,尚缺乏成熟的能被大规模推广应用的污染土壤修复或治理技术,主要原因是缺乏价格低廉且效果显著的绿色修复材料。生物炭(Biochar)属于黑炭(Black carbon)范畴的一种,具有多种环境效益,比如改良土壤肥力^[2]、碳库中的“增汇减排”作用^[3-4]、环境污染修复^[5]等,并且可用于制备生物炭的原材料来源广泛,这使得其在农业和环境中具有广阔的应用前景,近年来成为土壤学和环境科学领域的研究热点。统计表明,我国每年产生的农业废弃物超过40亿t,其中农作物秸秆高达7亿t,利用高温裂解炭化技术制成生物炭后还田,是一种变废为宝的新途径,其市场潜力及应用前景巨大^[6]。

生物炭影响农业土壤环境中重金属^[7]、农药^[8]和氮磷^[9]的形态分布、迁移转化、生物有效性及生态效应等均已被广泛报道。研究表明,生物炭作为“钝化剂”输入受污染土壤可显著降低土壤中Cd、Pb等金属离子的迁移性^[10],同时,生物炭作为一种肥料缓释载体^[11],会直接影响作物的生长和产量,但是已报道的结果往往大相径庭,这与土壤类型和生物炭的种类密切相关^[12]。当前有关生物炭对作物生长及产量影响的研究大多基于实验设计和条件不同的盆栽实验,故结论存在不一致性^[13]。

本试验选择广东省韶关市仁化县矿山周边重金属污染农田土壤为研究对象,在土壤中施用不同量棕榈丝生物炭,分析不同量生物炭施用对土壤基本理化性状、玉米生长发育和产量的影响,以及降低作物对重金属富集的效果,确定最佳的生物炭用量,为受矿区重金属污染的土壤环境治理提供一种低廉环保的修复技术手段,也为生物炭的农用意义提供科学的理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验研究地点位于广东省韶关市仁化县董塘镇某矿区重金属中度污染农田。董塘镇地处粤北山区,整个地形四面山地,中间小盆地,以丘陵山地为主,属丹霞山风景名胜。地理位置为东经 $113^{\circ}30' \sim 114^{\circ}02'$,北纬 $24^{\circ}56' \sim 25^{\circ}27'$,冬春冷,夏秋热,年平均气温为 19.6°C ,气候为中亚热带季风气候,年平均降雨量为1665 mm。农业种植以水稻、花生和玉米为主。

1.2 供试材料

1.2.1 土壤

试验前采集农田表层土壤(0~15 cm),风干,研磨,分别过2 mm筛和0.25 mm筛,用于分析土壤pH、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮和阳离子交换量(CEC)等理化性质,同时测定土壤中有效态镉(Cd)和铅(Pb)等重金属含量^[14],结果见表1。

1.2.2 生物炭

表1 供试材料基本理化性质
Table 1 Basic properties of test materials

供试材料	材料类型	有效态 Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效态 Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH(H ₂ O)	有机质或 C 含量/%	阳离子交换量 CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解 N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
土壤	红壤	5.49	321.70	4.73	2.69	4.53	112.83	48.90	54.67
生物炭	棕榈丝炭	n.d.	n.d.	10.12	42.13	28.45	1 723.64	2 486.47	3 416.95

注:n.d.为未检出;土壤pH值的测定采用1:2.5的土水比,生物炭pH值的测定采用1:10的炭水比;土壤为有机质百分比,生物炭为C含量百分比。

生物炭由广州中壳炭业有限公司提供,原材料棕榈丝经过高温(550℃)裂解制备生成实验所用的棕榈丝生物炭。其基本理化性质见表1,可见有机碳含量高达421.3 g·kg⁻¹,pH值为10.12。

1.2.3 玉米品种

试验选用种植玉米品种为“粤甜9号”,由广东省农业科学院作物研究所提供。

1.3 试验设计

按照试验目的共设5个处理,采用随机区组设计,每个处理3个重复,总共15个小区,每个小区面积为20 m²(10 m×2 m)。生物炭施用量分别为0、5、10、20、30 t·hm⁻²,试验处理编号分别为T1~T5,T1为不施生物炭的对照(CK)。每个小区种植玉米2行,行距60 cm,株距30 cm,于2015年4月2日播种,每穴种子2粒,定苗1株,至2015年7月2日收获,生长周期为3个月。种植玉米前一个月,先将生物炭按试验设置的用量均匀施于小区农田土壤表层,并使用农业翻耕机在耕作层翻耕土壤使生物炭材料和土壤充分混匀,老化平衡一个月后播种。作物栽培管理措施保持与正常生产一致,适时进行杀虫、除草和浇水。玉米幼苗期每666.7 m²施尿素6 kg、氯化钾4 kg,生长中期分两次施肥,第一次每666.7 m²施尿素5 kg、氯化钾3 kg,在抽雄前7~10 d进行第二次施肥,每666.7 m²施尿素7 kg、氯化钾4 kg。玉米收获后分别测定不同处理的玉米产量、株高和叶片的净光合速率等指标,以及不同处理间玉米各部位(玉米粒、玉米芯、玉米叶和玉米秆)中的重金属累积量;同时采集每个小区土壤样品,分别测定土壤pH、有机质含量、CEC和养分等指标。

1.4 分析方法

pH值以电位测定法测定,土壤pH按照水:土=2.5:1,生物炭pH按照水:炭=10:1进行测定;土壤有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化容量法测定,土壤有机碳通过土壤有机质及其换算系数1.724转化得到;阳离子交换量采用乙酸钠浸提火焰光度计法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用0.5 mol·L⁻¹的NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法,土壤速效钾采用1 mol·L⁻¹的NH₄OAc浸提-火焰光度计法。生物炭的C元素含量使用元素分析仪测定(德国Elementar公司Vario ELⅢ)。

植物样品Cd和Pb含量分析采用HNO₃-HClO₄消煮,土壤样品有效态Cd和有效态Pb含量分析采用0.1 mol·L⁻¹HCl浸提,然后利用原子吸收光谱仪

(美国PerkinElmer公司AA800)测定。

株高按照从地面至玉米植株直立后最高点的高度来测量。于玉米收获期,选择晴天上午的10:00—11:00之间,每小区选取3株生长均匀的玉米叶片,利用LI-6400便携式光合系统分析仪和SPAD-502型叶绿素计,测定玉米叶片净光合速率。

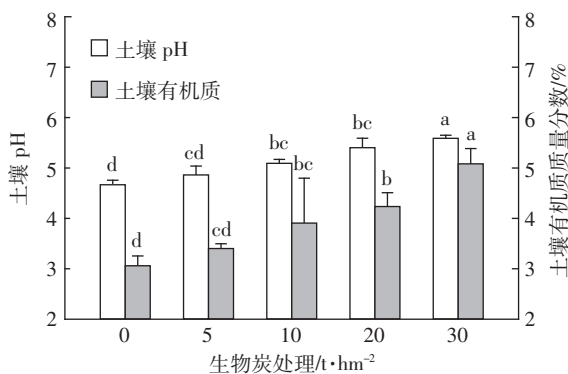
1.5 数据统计分析

采用SPSS 18(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)和SigmaPlot 12.0(Systat Software Inc., San Jose, CA, USA)进行数据拟合,用Student's *t*检验确定两种处理之间的差异性。此外,用单因子(One-way)、双因子(Two-way)或三因子(Three-way)变异数分析(ANOVA)和邓肯多范围测试(Duncan's Multiple Range Test)确定处理之间的显著性差异,当 $P < 0.05$ 时表示差异具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 生物炭对土壤pH和有机质的影响

土壤pH值是土壤的重要理化属性,直接影响重金属在农田系统中的移动性和有效性。土壤有机质是土壤肥力的重要指标,在改良土壤结构,改善土壤通气性和透水性,增加土壤保肥能力以及为植物提供营养等诸多方面发挥着重要作用^[15]。施用棕榈丝生物炭后,各处理土壤的pH值均有所提高,且提高的幅度随生物炭用量的增加而增大,相对于不施用生物炭的T1处理(CK, pH=4.67),pH值最低增加了0.42个单位(5 t·hm⁻², T2),而最高增加达0.92个单位(30 t·hm⁻², T5),T2、T3和T4的pH值均有所提升,但T3和T4处理间差异不显著(图1)。生物炭本身灰分中富含各种氢氧化物和碳酸盐等碱性物质^[16],故大多生物炭偏碱性,施入土壤能有效提高土壤的pH值。施用生物炭后,土壤有机质的提升变化趋势与pH变化趋势类似,土壤有机质含量随生物炭施用量的增加而增加,T1与T3、T4与T5处理呈显著($P < 0.05$)增加,从最低的3.06%提高至5.08%,当施用量为30 t·hm⁻²生物炭(T5)时,其土壤有机质含量是对照的1.66倍(图1)。土壤有机质的特点是随时间而消耗,故土壤需要有外来的有机质补给以维持其基本生产力。生物炭本身富含大量的烷氧基、芳基等稳定芳香化合物和部分不稳定脂肪族化合物,进入土壤后对土壤有机质形成直接的补充作用。例如,在土壤中添加300℃制备的生物炭,培养112 d后发现,土壤总有机碳含量从6.94 g·kg⁻¹显著提升至10.25 g·kg⁻¹,而进一步研究发



同一组柱状图上不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图1 生物炭对土壤 pH 和有机质含量的影响

Figure 1 Influence of biochar additions on soil pH and organic matter content

现土壤有机质含量的增加源于生物炭输入所携带的稳定组分所产生的直接贡献^[17]。此外,生物炭的添加有利于形成并提高土壤团聚体的稳定性,从而减少了土壤有机质的淋失^[18]。生物炭作为新型的土壤调理剂,尤其适宜对我国南方酸性土壤进行改良。这与已有的研究结果是一致的^[19]。

土壤有机碳作为土壤质量和功能的核心,被认为是影响土壤肥力和作物产量高低的决定性因子^[20]。为了进一步了解生物炭添加对原有土壤性状的影响,我们将生物炭的施用量与土壤有机碳含量进行相关性分析(图2)。由图2可知,生物炭施用量和土壤有机碳呈很好的正相关关系($R^2=0.9779$),生物炭施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤有机碳含量比不施用生物炭时提高了 66.12%,究其原因可能与本试验所用生物炭的有机碳含量高达 42.13%有关。

2.2 生物炭对土壤 CEC 的影响

土壤阳离子交换量是衡量和评价土壤保肥能力的重要指标之一。在本试验中,施用生物炭显著提高

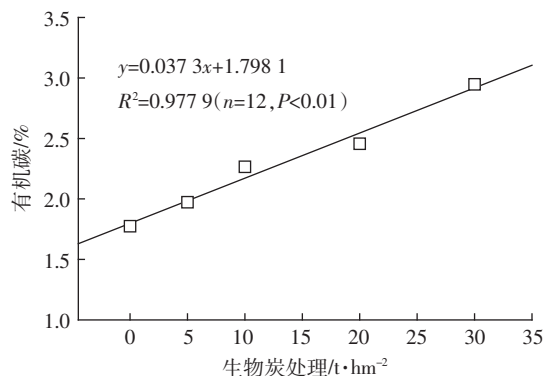


图2 生物炭施用量与土壤有机碳含量的相关关系

Figure 2 Correlation between biochar additions and soil organic carbon content

了耕层土壤的阳离子交换量,最高值是 T4 处理的 $5.26 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,比 CK 处理提高了 10.74%(图3)。土壤胶体表面的可变电荷受土壤 pH 的影响极大,生物炭作为土壤改良剂添加到土壤中,通过改变土壤 pH 值和土壤有机质而引起土壤 CEC 的变化。研究发现,随着生物炭滞留土壤时间的延长,其表面在生物氧化和非生物氧化共同作用下,会形成更多的含氧官能团,增加其表面电荷量,导致土壤 CEC 值的升高^[21]。然而,生物炭由于材料的不同以及制备温度的差异,其施入土壤后对土壤 CEC 的影响还有待进一步研究。

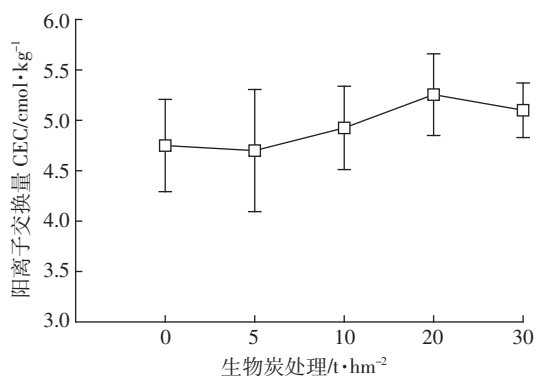


图3 生物炭对土壤 CEC 的影响

Figure 3 Influence of biochar additions on soil CEC

2.3 生物炭对土壤养分的影响

土壤养分是土壤肥力的物质基础。生物炭的多孔特性能截留更多的养分,施入土壤后通过缓解土壤养分流失来影响养分在土壤中的含量。生物炭施用对土壤有效磷和速效钾含量的改变各不相同。研究发现,各处理生物炭均能提高土壤有效磷的含量,当施用量为 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,生物炭对土壤有效磷的提高效果最好, T2、T4、T5 处理之间差异并不明显。土壤速效钾含量的提升则随生物炭的增加而增加,当施用量达到 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,速效钾含量是 CK 处理的 3.1 倍,达到 $292.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图4)。相对于种植玉米前采集的原土,未施用生物炭处理(CK)土壤速效钾含量也有所提升,可能是田间管理常规施肥所致。土壤碱解氮含量最高的是 T2 处理,达到 $164.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而最低为 T4 处理的 $140.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,不同生物炭施用量对土壤碱解氮含量的影响并不显著。生物炭特别是植物来源的生物炭含有丰富的钾元素,本试验所使用的生物炭速效钾含量高达 $3416.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施用于土壤中显著提高了土壤速效钾含量。

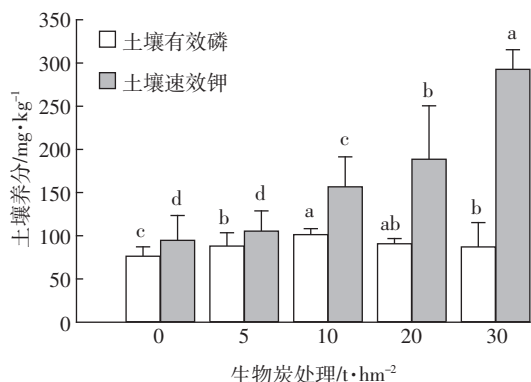


图 4 生物炭对土壤养分的影响

Figure 4 Effect of biochar additions on soil nutrients

2.4 生物炭对植物吸收重金属的影响

不同用量生物炭处理均能降低土壤有效铅和有效镉的含量,降低幅度最为明显的是 T4 处理,有效铅由 CK 的 $352.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低为 $312.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而有效镉由 CK 的 $5.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低为 $4.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低幅度分别为 11.3%和 23.9%。而对于作物地上部,各处理均能有效降低 Pb、Cd 在玉米粒、玉米芯、玉米叶和玉米秆中的累积,以最重要的可食部分玉米粒为例,当施用量为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时(T4),玉米粒中 Pb 的含量为 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对于 CK 处理的 $0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低幅度高达 49.4%;玉米粒中 Cd 的含量为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对于 CK 处理的 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低幅度高达 45.4%。虽然根据食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)的要求(铅 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;镉 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),各处理玉米粒重金属含量均超标,但两种常见重金属 Pb 和 Cd 含量比 CK 处理降低的幅度均接近一半,说明生物炭有利于减少重金属在植物体内的输送和积累。

图 5 和图 6 分别为 Pb 和 Cd 在玉米地上各部位的分布,对于 Pb 而言,更多地富集于玉米秆中,其次为玉米叶。T2~T5 各处理随生物炭用量的增加,玉米地上部 Pb 的总含量呈降低趋势,但是 T2 处理比 CK 更容易富集 Pb。而对于 Cd 来说,更容易富集的部位是玉米叶,其次为玉米秆,生物炭处理后玉米均不容易富集 Cd,T5 处理 Cd 的总含量仅为 CK 的 46.33%。不管是 Pb 还是 Cd,其在最重要的可食部位玉米粒中的含量均最少。生物炭富含各种官能团,在添加到土壤中后,会与土壤中的 Pb 和 Cd 结合,降低其可移动性和生物有效性。另外,生物炭的碱性属性也会提升土壤的 pH,从而影响 Pb、Cd 的水解平衡,使这些金属离子通过络合、沉淀等作用被固定下来^[22-23]。因此,

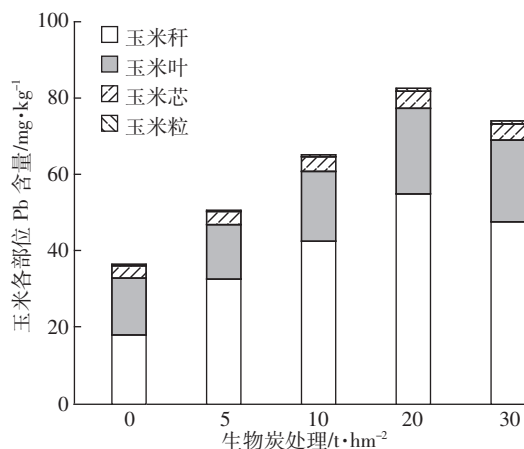


图 5 生物炭处理对玉米 Pb 含量的影响

Figure 5 Effect of biochar additions on Pb content of maize

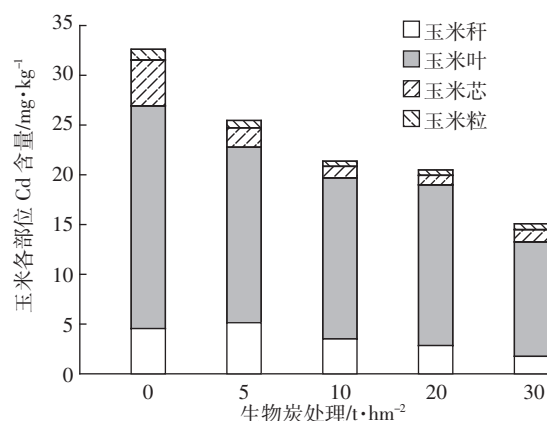


图 6 生物炭处理对玉米 Cd 含量的影响

Figure 6 Effect of biochar additions on Cd content of maize

通过向重金属污染土壤中施入生物炭,可以增强土壤的吸附性能,消减土壤环境中重金属向水体和生物体迁移的能力,降低其生物有效性,不失为一种快捷有效的土壤改良与环境治理手段。

2.5 生物炭对玉米生长发育和产量的影响

施用生物炭后,各处理对玉米收获期叶片的净光合速率、玉米株高和玉米产量均有促进效应,且总体随生物炭施用量的增加而增加。生物炭施用量为 5、10、20、30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,其株高分别为 158.89、189.89、192.00、207.22 cm,比 CK 处理分别提高了 15.1%、37.5%、39.0%和 50.1%。净光合速率反映植物在单位时间内积累的有机物的量,从表 2 可知,高生物炭用量处理,其净光合速率显著高于低生物炭用量处理和 CK 处理。生物炭处理对玉米产量的影响最为明显,不同生物炭用量均能显著增加玉米的产量,且其增产效果随用量的增加而增加,T2~T5 生物炭处理后,玉米

表2 生物炭对玉米生长发育和产量的影响

Table 2 Influence of biochar on growth and yield of maize

处理	生物炭施用量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	株高/ cm	玉米产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	净光合速率/ $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
T1	0	138.10c	995.83c	11.35c
T2	5	158.89b	1 740.83c	20.58b
T3	10	189.89a	6 132.50b	22.10b
T4	20	192.00a	8 798.33a	22.03b
T5	30	207.22a	8 858.33a	30.73a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

产量分别为CK的1.75、6.16、8.84倍和8.90倍。当施用量达到 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时,T4和T5处理对玉米的增产效应并无显著性差异,考虑到经济成本,施用量在 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右为宜。

3 结论

(1)生物炭显著提高了土壤pH值和有机质含量,其提升幅度随施用量的增加而升高;土壤CEC随生物炭施用量的增加先升高后降低。生物炭施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤速效钾含量是CK处理的3.1倍,不同生物炭处理对土壤碱解氮含量的影响不显著。

(2)不同生物炭施用量均能降低土壤和玉米植株中Pb和Cd含量,当施用量为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米粒中Pb的含量降低幅度达49.4%,Cd的降低幅度达45.4%。

(3)生物炭对玉米的增产效果随施用量的增加而增加,5、10、20、 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的产量分别为CK的1.75、6.16、8.84倍和8.90倍。

(4)生物炭通过提高土壤pH值和有机质含量,实现了对南方酸性土壤的改良,对玉米的生长发育和产量均有促进作用。考虑到污染程度、经济成本以及农业生产的实际需求,应该因地制宜地选择合适的生物炭种类和施用量。

参考文献:

- [1] 张 晗, 靳青文, 黄仁龙, 等. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征[J]. 土壤, 2017, 49(1): 141-149.
ZHANG Han, JIN Qing-wen, HUANG Ren-long, et al. Characteristics of heavy metal pollution in agricultural soils and bioaccumulation in plants of Dabaoshan mine[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 141-149.
- [2] Lehmann J, Kern D C, Glaser B. Amazonian dark earths: Origin properties management[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 125-139.
- [3] Kuhlbusch T A J, Andreae M O, Cachier H, et al. Black carbon formation by savanna fires: Measurements and implications for the global carbon cycle[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 23651-23665.
- [4] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [5] Cornelissen G, Gustafsson O, Bucheli T D, et al. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(18): 6881-6895.
- [6] 张 野, 何铁光, 何永群, 等. 农业废弃物资源化利用现状概述[J]. 农业研究与应用, 2014, 3: 64-67.
ZHANG Ye, HE Tie-guang, HE Yong-qun, et al. Overview of utilization status of agricultural wastes[J]. *Agricultural Research and Application*, 2014, 3: 64-67.
- [7] Cao X D, Ma L, Gao B, et al. Dairy manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(9): 3285-3291.
- [8] Jones D L, Edwards-Jones G, Murphy D V. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(4): 804-813.
- [9] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 436-442.
- [10] 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): 1411-1419.
LI Li, LIU Ya, LU Yu-chao, et al. Review on environmental effects and applications of biochar[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8): 1411-1419.
- [11] 高海英, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24): 207-213.
- [12] Liu X, Zhang A, Ji C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 583-594.
- [13] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175-187.
- [14] 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, 1999.
LU Ru-kun. Traditional methods for analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 1999.
- [15] 房 彬, 李心清, 赵 斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1292-1297.
FANG Bin, LI Xin-qing, ZHAO Bin, et al. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [16] 何绪生, 张树清, 余 雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.
HE Xu-sheng, ZHANG Shu-qing, SHE Diao, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Sci-*

- ence Bulletin, 2011, 27(15):16-25.
- [17] Yin Y F, He X H, Gao R, et al. Effects of rice straw and its biochar addition on soil labile carbon and soil organic carbon[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):491-498.
- [18] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal; A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [19] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7):516-525.
- [20] 邱建军, 王立刚, 李 虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1):154-161.
- QIU Jian-jun, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):154-161.
- [21] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society America Journal*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [22] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3):654-658.
- GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of amendment on Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):654-658.
- [23] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原不同土壤中 Cd 形态分级及其生物有效性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(4):135-142.
- MU Xiao-hui, LI Shi-qing, DANG Rui-juan. Study of soil Cd fractionation and its bioavailability on the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)*, 2008, 36(4):135-142.

欢迎订阅 2018 年《农业资源与环境学报》

《农业资源与环境学报》(Journal of Agricultural Resources and Environment)创刊于 1984 年,由农业部主管、农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的国家级学术期刊,被评为中国科技核心期刊、天津市优秀期刊。被中国学术期刊(光盘版)、万方数据、百度文库、豆丁、中国学术文摘数据库核心版(CSAD)以及美国乌利希期刊指南、化学文摘(CA)、国际农业与生物科学中心(CABI)、EBSCO、DOAJ、ProQuest 等重要数据库收录。

作为与一级学科“农业资源与环境”对应的学报,《农业资源与环境学报》主要刊登土壤、水、养分及生物质等自然资源的高效利用及生态环境保护方面的研究论文。所设栏目:

- | | |
|---------|--------------|
| 一、战略与综述 | 六、产地环境与农产品安全 |
| 二、土地资源 | 七、生态农业 |
| 三、养分资源 | 八、生物多样性保护 |
| 四、水资源 | 九、乡村环境 |
| 五、生物质资源 | 十、数据挖掘及信息化 |

《农业资源与环境学报》为双月刊,大 16 开,96 页,逢单月 10 日出版,每册定价 30.00 元,全年 180.00 元。国际标准刊号:ISSN 2095-6819,国内统一刊号:CN 12-1437/S,国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号:6-40,国外发行代号:BM3272。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮政编码:300191

银行:中国农业银行天津滨水西道支行

户名:农业部环境保护科研监测所

电话:022-23611102

电子信箱:caed@vip.163.com

帐号:02-190101040001154

纳税人识别号:12100000401229113Q

传真:022-23674336

网址:www.aed.org.cn