

肖瑞芳, 沈普翠, 赵秀兰. 三种生物质炭对红壤和黄壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 915-920.

XIAO Rui-fang, SHEN Pu-cui, ZHAO Xiu-lan. Effects of three types of biochar on bioavailability of cadmium in a red soil and a yellow soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 915-920.

## 三种生物质炭对红壤和黄壤镉有效性的影响

肖瑞芳<sup>1,2</sup>, 沈普翠<sup>3</sup>, 赵秀兰<sup>1,2\*</sup>

(1.西南大学资源环境学院,教育部三峡库区生态环境重点实验室,重庆 400715; 2.重庆市农业资源与环境研究重点实验室,重庆 400716; 3.重庆市石柱县农业委员会,重庆 石柱 409100)

**摘要:**采用盆栽试验,研究了5%的花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭对红壤和黄壤中有效镉含量及玉米幼苗镉吸收和转运的影响。结果表明:3种生物质炭使红壤和黄壤的pH分别提高0.12~0.59和0.21~1.00,有机质含量分别提高35.43%~83.34%和52.14%~142.82%,均达到显著性水平( $P<0.05$ );生物质炭使红壤和黄壤有效镉含量分别降低12.8%~20.1%和17.7%~29.9%,降幅在红壤中以花生壳炭处理最大,黄壤中则以小麦秸秆炭处理最大,但两种土壤中花生壳炭、小麦秸秆炭处理有效镉含量差异不显著;3种生物质炭一定程度上可抑制红壤中玉米的生长,但花生壳炭和竹炭可促进黄壤中玉米幼苗的生长;花生壳炭和竹炭使红壤中玉米幼苗地上部镉含量分别降低19.63%和23.10%,竹炭使黄壤中玉米幼苗根部镉含量提高14.88%,其余处理对玉米幼苗根部和地上部的镉含量影响均不显著。这说明尽管生物质炭可通过提高土壤pH和有机质含量降低红壤和黄壤的有效镉含量,但对植物镉含量的影响则因土壤类型和生物质炭种类而异。

**关键词:**生物质炭;镉;生物有效性

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)05-0915-06 **doi:**10.11654/jaes.2016-1441

### Effects of three types of biochar on bioavailability of cadmium in a red soil and a yellow soil

XIAO Rui-fang<sup>1,2</sup>, SHEN Pu-cui<sup>3</sup>, ZHAO Xiu-lan<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, the Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3.Agriculture Committee Shizhu Tujia Nationality Autonomous County, Shizhu 409100, China)

**Abstract:** A pot experiment was carried out to investigate the effects of three types of biochar—peanut shell biochar (PSB), bamboo biochar (BB) and wheat straw biochar (WSB) on the bioavailability of cadmium (Cd) in a red soil and a yellow soil. The biochar was applied at the rate of 5%. The results showed that the pH values of the red soil and the yellow soil were increased by 0.12 to 0.59 unit, and 0.21 to 1.00 units, respectively, the contents of organic matter were increased by 35.43% to 83.34% and 52.14% to 142.82% respectively, but the contents of available Cd were decreased by 12.8% to 20.1% and 17.7% to 29.9%, respectively. Although the highest decrease in the available Cd content was observed in the PSB-treatment for the red soil and in the WSB-treatment for the yellow soil, there were no significant difference for soil available Cd between the two treatments. The growth of corn seedlings were, to a certain extent, inhibited by biochar application in red soil, but were promoted by application of PSB and BB in the yellow soil. The contents of Cd in the shoot of corn seedlings were decreased by 19.63% and 23.10% for the treatment of PSB and BB, respectively, in the red soil, but the Cd content in the root was increased by 14.88% for the BB treatment in the yellow soil. The other treatments had no significant influence on Cd contents in corn seedlings. Therefore, it is concluded that although the biochar could decrease the content of available Cd through increasing pH values and organic matter content of soils, the effect of biochar on Cd content in plants varies with the types of soil and biochar.

**Keywords:** biochar; cadmium; bioavailability

收稿日期:2016-11-14

作者简介:肖瑞芳(1991—),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学。E-mail:572578042@qq.com

\*通信作者:赵秀兰 E-mail:zx1@swu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41471272)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471272)

工业“三废”的排放、农业生产等活动造成的土壤重金属污染问题日益严重<sup>[1]</sup>。2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》表明,我国土壤环境状况不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%,其中镉(Cd)的点位超标率高达7%<sup>[2]</sup>,对镉污染土壤的修复治理十分迫切。

生物质炭是生物质在有限供氧的密闭环境中于相对较低的温度条件下(<700℃)热解生成的一类富含碳素的固态物质<sup>[3]</sup>。因其具有来源广泛、比表面积大、孔隙丰富、pH及阳离子交换量高、吸附性和稳定性强等独特的理化性质,在重金属污染农田原位修复中具有较大的应用潜力和前景,成为近年来重金属污染土壤领域的研究热点之一<sup>[3-6]</sup>。但是,受生物质炭的性质和施用量、土壤性质及肥力、重金属种类等多方面因素的影响,关于生物质炭修复重金属污染土壤效果的研究结果并不一致,国内外对生物质炭的广泛应用尚存在争议,必须根据土壤条件和重金属类型选择合适的生物质炭,才能获得较好的修复效果<sup>[7]</sup>。红壤和黄壤是我国重要的土壤资源,本研究采用盆栽试验,研究了花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭对两种土壤有效镉含量、玉米幼苗生长及玉米对镉吸收和转运的影响,为合理选用生物质炭,修复治理这两种土壤的镉污染提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤为红壤和黄壤,采自云南昭通0~20 cm表层旱地土壤,将土壤自然风干,粉碎过2 mm筛,待

用。花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭购自某公司,炭化温度为450~500℃,土壤及生物质炭基本理化性质见表1。

供试植物为玉米(*Zea Mays* L.),品种东单3号。

### 1.2 试验设计

盆栽试验在西南大学温室进行。施加尿素0.33 g·kg<sup>-1</sup>、磷酸二氢钾0.52 g·kg<sup>-1</sup>作为基肥。设对照(CK,不加生物炭)、花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭4个处理,每处理3个重复。生物质炭的添加量根据前期静态培养实验中土壤性质变化与吸附解吸结果确定为5%(W/W)。称取土壤1.0 kg,以CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O溶液形式添加镉,添加浓度为3 mg·kg<sup>-1</sup>,混匀,将基肥和生物质炭一次性加入土壤,调节含水量至田间持水量的60%~70%,再次混匀,装入高19 cm、口径21 cm的塑料盆内陈化1周。每盆播种玉米4粒,三叶期留下长势一致的苗2株,定期补充去离子水以保持水分含量。生长1个月后测量玉米株高,取样,分成根和地上部,用去离子水洗净,于105℃杀青、60℃烘干,称量根部和地上部干重,粉碎备用。试验结束时取出土壤样品,风干、磨细,分别过2 mm和0.25 mm筛备用。

### 1.3 分析方法

土壤及生物质炭基本理化性质测定参照《土壤农化分析与环境监测》<sup>[8]</sup>进行。具体方法为:土壤pH采用固液比1:2.5浸提-酸度计测定,有机碳采用重铬酸钾容量法测定,CEC采用乙酸铵浸提-凯氏蒸氮法测定;Cd全量采用HCl-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消解,土壤Cd有效量采用DTPA浸提,植株Cd含量采用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消解,原子吸收分光光度计(TAS-990)测定。测定过程中采用标样GBW07428(GSS-14)和GBW10046

表1 供试土壤及生物质炭的基本理化性质  
Table 1 Physiochemical properties of tested soils and biochar

理化参量	土壤		生物质炭		
	红壤	黄壤	花生壳炭	竹炭	小麦秸秆炭
pH	6.09	5.77	10.33	10.48	10.23
阳离子交换量 CEC/cmol·kg <sup>-1</sup>	18.93	15.48	—	—	—
有机碳/g·kg <sup>-1</sup>	12.13	9.43	189.11	102.48	235.50
凯氏氮/g·kg <sup>-1</sup>	0.25	0.32	7.46	8.24	6.26
有效氮/mg·kg <sup>-1</sup>	57.36	41.33	—	—	—
有效磷/mg·kg <sup>-1</sup>	14.89	21.71	—	—	—
有效钾/mg·kg <sup>-1</sup>	116.96	91.84	—	—	—
总镉/mg·kg <sup>-1</sup>	0.232	0.280	0.132	0.121	0.283
比表面积(60目)/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	—	—	12.17	27.66	16.89
主要官能团	—	—	羟基、烷烃、酰胺基、芳香化 C-H、脂族醚 C-O	羟基、酰胺基、芳香化 C-H、饱和 C-H	羟基、胺基、酰胺基、芳香化 C-H、脂族醚 C-O

(GSB-24) 进行质量控制。生物质炭 Cd 全量采用  $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  消化法测定,比表面积采用 JW-004 型氮吸附比表面仪测定,表面官能团采用 TENSOR27 型傅里叶变换红外光谱仪测定。

#### 1.4 数据分析

应用 Excel 2007、SPSS 21.0 和 Origin8.5 进行相关数据的计算、方差分析、相关性分析和图形制作,所有数据的统计分析均在  $\alpha=0.05$  水平上进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物质炭对土壤 pH 和有机质的影响

pH 是土壤溶解-沉淀、吸附-解吸等反应的重要因素。通过添加碱性物质提高酸性土壤 pH 是重金属污染土壤原位钝化修复最常用的方法之一。生物质炭呈碱性,具有中和土壤酸度的能力,可有效降低土壤酸度,提高土壤 pH<sup>[9]</sup>。从表 2 看出,与 CK 相比,添加花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭使红壤 pH 分别提高 0.59、0.12 和 0.49,黄壤 pH 分别提高 1.00、0.21 和 0.81,均达到显著性水平( $P<0.05$ )。杨惟薇等<sup>[9]</sup>研究发现,在镉污染潮土中分别添加 1% 蚕沙炭、水稻秸秆炭、木薯秆炭和甘蔗叶炭,45 d 后土壤 pH 值分别升高了 0.98、0.76、0.63 和 0.52;Cui 等<sup>[10]</sup>研究表明,施加不同用量小麦秸秆生物质炭使铅镉污染土壤 pH 值提高了 1.8%~22.6%。本研究的结果与上述结果基本一致。在所有处理中,土壤 pH 的提高幅度以花生壳炭处理最大,可能与豆科物料制备的生物质炭的含碱量高于非豆科物料制备的生物质炭有关<sup>[11]</sup>。Yuan 等<sup>[12]</sup>的研究也发现,以豆科物料制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果较非豆科物料制备的生物质炭更好。竹炭的 pH 最高,而其对土壤 pH 的提高幅度最低,可能

与其比表面积最大(表 1)、吸附性能强、缓冲容量大、释放的能中和土壤酸性的碱性物质少有关。表 2 还表明,生物质炭对黄壤 pH 的提升作用强于红壤。这可能与黄壤的阳离子交换量低、缓冲性较弱有关。

有机质是衡量土壤肥力的主要指标之一,也是影响土壤重金属行为的重要性质之一。添加生物质炭后,红壤和黄壤中有机质含量均显著提高( $P<0.05$ ),其原因与生物质炭本身富含碳,且结构稳定不易矿化,能显著提高土壤碳库有关<sup>[13]</sup>,也可能是生物质炭抑制土壤固有有机碳的矿化作用从而提高了土壤有机碳的含量<sup>[14]</sup>。两种土壤有机质的提高幅度均以小麦秸秆炭处理效果最明显,增幅分别达 83.34% 和 142.82%。这与小麦秸秆炭本身有机碳含量高有关。

### 2.2 生物质炭对土壤有效态 Cd 含量的影响

土壤有效态重金属指能够被植物吸收利用的部分<sup>[15]</sup>。由图 1 可知,添加生物质炭显著降低了两种土壤的有效 Cd 含量( $P<0.05$ ),表明生物质炭对两种土壤 Cd 具有钝化作用。花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭处理使红壤中有效 Cd 含量分别降低 20.1%、12.8% 和 17.1%,以花生壳炭处理降低幅度最大,但花生壳炭、小麦秸秆炭之间的差异不显著;使黄壤中有效 Cd 含量分别显著降低 23.5%、17.7% 和 29.9%,降幅大于红壤。这表明生物质炭对黄壤中 Cd 的钝化效果优于红壤,小麦秸秆炭和花生壳炭对 Cd 的钝化效果优于竹炭。目前,生物质炭可降低土壤 Cd 的有效性已为大量研究所证实<sup>[11,16]</sup>。土壤 pH 和有机质是影响土壤重金属有效态含量的重要因素,相关分析结果表明,红壤和黄壤有效 Cd 含量与其 pH 的相关系数分别为 -0.86\*\* 和 -0.71\*\*,与有机质的相关系数分别为 -0.72\*\* 和 -0.77\*\*,均达极显著水平( $r_{(10,0.01)}=0.71$ ),表

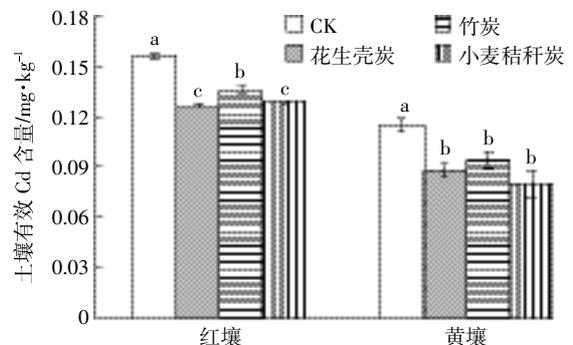
表 2 生物质炭对土壤 pH 和有机质的影响

Table 2 Effect of biochar on basic properties of tested soils

处理	红壤		黄壤	
	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	6.05±0.03d	21.73±0.38d	5.77±0.01d	16.86±0.45c
花生壳炭	6.63±0.03a	29.43±0.67c	6.77±0.02a	25.65±0.39b
竹炭	6.17±0.05c	31.63±0.21b	5.98±0.01c	26.79±0.49b
小麦秸秆炭	6.53±0.04b	39.84±0.38a	6.58±0.02b	40.94±0.73a

注:结果表示为平均值±标准误;同列数据后小写字母不同表示不同处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )。下同。

Note: Results are expressed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant differences in same column ( $P<0.05$ ). The same below.



不同小写字母表示同一土壤不同处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ )

图 1 生物质炭对土壤有效 Cd 含量的影响

Figure 1 Effect of biochar on availability of cadmium in soils

明提高土壤 pH 和有机质是生物质炭钝化土壤 Cd 的重要途径。此外,花生壳炭和小麦秸秆炭对 Cd 的钝化效果优于竹炭,可能也与前两种生物质炭对土壤 pH 的提升效果高于竹炭有关(表 2)。

### 2.3 生物质炭对玉米幼苗生长的影响

不同处理下玉米幼苗的株高及地上部、根部干物质量见表 3。生物质炭对红壤中玉米株高的影响不显著,但花生壳炭使黄壤中玉米幼苗的株高显著提高。与 CK 相比,生物质炭使红壤中玉米幼苗根和地上部的干重均降低,降低幅度以小麦秸秆炭处理最大,达显著水平( $P<0.05$ )。黄壤中各处理对根干重的影响不显著,但花生壳炭和竹炭处理使玉米幼苗地上部干重分别显著提高 11.43% 和 13.84%,小麦秸秆炭则使玉米幼苗地上部干重显著降低,表明不同生物质炭在不同土壤中对作物生长状况影响不同。

生物质炭含有丰富的营养元素,施入土壤后可提高土壤肥力、促进作物生长、提高作物产量和品质<sup>[17]</sup>,已在印度芥菜<sup>[18]</sup>、烟草<sup>[19]</sup>、青菜和萝卜<sup>[20]</sup>、油菜<sup>[21]</sup>等作物上得到证实,但也有研究认为生物质炭对作物产量无显著影响,甚至抑制作物生长。本研究中小麦秸秆炭抑制了玉米幼苗生长,与张晗芝等<sup>[22]</sup>的结果一致,他们的盆栽试验结果表明,玉米苗期的前 33 d,小麦秸秆炭(添加量为 2.4、12、48 t·hm<sup>-2</sup>)对玉米苗期的生物量均有不同程度抑制作用,且炭用量越多抑制作用越强,可能是由于生物质炭的碳氮比很高,其易分解部分生物质炭的分解导致土壤对氮素的固定,降低了土

壤的有效氮,从而限制了植株对有效氮的吸收。此外,张娜等<sup>[23]</sup>施用小麦秸秆炭的田间试验结果还表明,与低施用量(5 t·hm<sup>-2</sup>)相比,高施用量生物炭(10 t·hm<sup>-2</sup>)会造成玉米早衰,不利于玉米粒重的形成。本研究中花生壳炭和竹炭对玉米幼苗的生长在红壤中表现为抑制、在黄壤中表现为促进,说明生物质炭对作物生长的影响因土壤性质的不同而异。

### 2.4 生物质炭对玉米幼苗 Cd 含量及转移系数的影响

不同处理玉米幼苗根部和地上部的 Cd 含量及转移系数如表 4 所示。与 CK 相比,红壤中,生物质炭对玉米根部 Cd 含量的影响不显著,小麦秸秆炭对玉米地上部 Cd 含量影响也不显著,但花生壳炭和竹炭使玉米地上部 Cd 含量显著降低,降幅分别为 19.63% 和 23.10%;黄壤中,除竹炭使根部 Cd 含量显著提高外,其余处理根和地上部的 Cd 含量差异均不显著。这进一步说明,生物质炭对玉米根和地上部 Cd 含量的影响因土壤和生物质炭类型的不同而异。

相关分析(表 5)结果发现,两种土壤中玉米根部和地上部 Cd 含量与土壤 pH、有机质含量和有效 Cd 含量相关性均不显著,表明生物质炭尽管提高了土壤 pH 和有机质含量,降低了土壤中 Cd 的有效性,但并不一定能降低植物中的 Cd 含量。这可能与植物对 Cd 的吸收受土壤条件、气候等众多因素的影响有关。

转移系数(地上部重金属含量/根部相应重金属含量)表示重金属在植株地上部-根间的转移能力<sup>[24]</sup>。如表 4 所示,两种土壤中,各处理下玉米幼苗体内 Cd

表 3 生物质炭对玉米幼苗生长的影响

Table 3 Effect of biochar on the growth of corn seeding

试验处理	红壤			黄壤		
	株高/cm	根干重/g·pot <sup>-1</sup>	地上部干重/g·pot <sup>-1</sup>	株高/cm	根干重/g·pot <sup>-1</sup>	地上部干重/g·pot <sup>-1</sup>
CK	90.83±0.36a	3.53±0.04a	8.49±0.21a	87.08±1.82b	3.44±0.14a	8.31±0.28b
花生壳炭	93.47±1.87a	3.06±0.12b	8.19±0.55a	96.37±4.01a	3.78±0.30a	9.26±0.25a
竹炭	89.13±3.01a	3.33±0.13ab	7.76±0.49a	91.53±1.79ab	3.25±0.24a	9.46±0.21a
小麦秸秆炭	87.47±1.81a	2.96±0.20b	5.58±0.23b	87.00±2.43b	3.32±0.13a	7.22±0.48c

表 4 生物质炭对玉米幼苗各部位 Cd 含量的影响

Table 4 Effect of biochar on the content and transformation of Cd in corn seedlings

试验处理	红壤			黄壤		
	根部/mg·kg <sup>-1</sup>	地上部/mg·kg <sup>-1</sup>	转移系数(TF)	根部/mg·kg <sup>-1</sup>	地上部/mg·kg <sup>-1</sup>	转移系数(TF)
CK	19.83±0.99a	12.38±2.08a	0.62	18.35±1.14b	9.11±0.68a	0.50
花生壳炭	21.43±1.72a	9.95±1.09b	0.46	18.45±0.72b	9.96±0.54a	0.54
竹炭	19.08±0.51a	9.52±0.87b	0.50	21.08±0.65a	9.89±1.21a	0.47
小麦秸秆炭	20.41±0.40a	11.96±0.41ab	0.59	18.90±1.24b	9.76±0.49a	0.52

表5 玉米幼苗植株镉含量与土壤性质的相关分析结果( $n=12$ )

Table 5 Correlation between Cd content in the root and root of corn seedlings and soil basic properties

土壤	部位	pH	有机质	有效镉
红壤	根部	0.422	0.094	-0.373
	地上部	-0.230	-0.096	0.382
黄壤	根部	0.510	0.264	0.261
	地上部	0.303	0.397	-0.260

的转运系数均小于1,表现为根部>地上部。这符合Cd在大多数植物体中的分布规律<sup>[15,25]</sup>。添加生物质炭使红壤中玉米幼苗Cd的转移系数降低,结果与Zheng等<sup>[26]</sup>和崔立强<sup>[25]</sup>分别在水稻和小麦中的研究一致。黄壤中,竹炭处理使Cd的转移系数略有降低,其他两种处理的转运系数略有增加,表明生物质炭对Cd在玉米幼苗体内的向上转移作用也因土壤类型的不同而异,产生原因有待进一步研究。

### 3 结论

(1)花生壳炭、竹炭和小麦秸秆炭均能显著提高红壤和黄壤的pH和有机质含量,土壤pH的提高幅度以花生壳炭处理最大,有机质的提高幅度则以小麦秸秆炭处理最大。

(2)生物质炭可显著降低两种土壤的有效Cd含量,对土壤Cd具有钝化作用,其对黄壤中Cd的钝化效果优于红壤,花生壳炭和小麦秸秆炭处理效果优于竹炭处理。

(3)3种生物质炭对红壤中玉米的生长有一定抑制作用,但花生壳炭和竹炭可促进黄壤中玉米地上部生长。

(4)花生壳炭和竹炭可显著降低红壤中玉米幼苗地上部的Cd含量,竹炭可显著提高黄壤中玉米幼苗根部的Cd含量,其余处理对两种土壤中玉米幼苗根部和地上部的Cd含量均无显著影响。红壤中生物质炭可抑制玉米Cd的向上转运,但黄壤中生物质炭对玉米Cd的向上转运影响不明显。

### 参考文献:

- [1] 马文超,刘媛,孙晓灿,等. 镉在土壤-香根草系统中的迁移及转化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3411-3418.  
MA Wen-chao, LIU Yuan, SUN Xiao-can, et al. Transfer and transformation characteristics of cadmium from soil to *Vetiveria zizanioides* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3411-3418.
- [2] 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)[2016-9-20]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm)

- qt/201404/t20140417\_270670.htm.
- Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin[N]. China Land and Resources News(2014-04-18)[2016-9-20]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm)
- [3] 王欣,尹带霞,张风,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.  
WANG Xin, YIN Dai-xia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 248-257.
- [4] 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.
- [5] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(11): 1450-1457.
- [6] 李瑞月,陈德,李恋卿,等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>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<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> in aqueous solution by biochars derived from different crop residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 1001-1008.
- [7] 李江遐,吴林春,张军,等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.  
LI Jiang-xia, WU Lin-chun, ZHANG Jun, et al. Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [8] 杨剑虹,王成林,代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.  
YANG Jian-hong, WANG Cheng-lin, DAI Heng-lin. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [9] 杨惟薇,张超兰,曹美珠,等. 4种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 239-243.  
YANG Wei-wei, ZHANG Chao-lan, CAO Mei-zhu, et al. Immobilization and remediation of cadmium contaminated soil with four kinds of biochars[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 239-243.
- [10] Cui L Q, Pan G X, Li L Q, et al. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: A five-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 93: 1-8.
- [11] 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 biochar and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 779-785.
- [12] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110-115.

- [13] Jing T, Wang J Y, Dippold M, et al. Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 556:89-97.
- [14] 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, 13:491-498.
- [15] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(6):2381-2391.  
CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, et al. Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6):2381-2391.
- [16] 许超, 林晓滨, 吴启堂, 等. 淹水条件下生物炭对污染土壤重金属有效性及养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):194-198.  
XU Chao, LIN Xiao-bin, WU Qi-tang, et al. Impacts of biochar on availability of heavy metals and nutrient content of contaminated soil under waterlogged conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):194-198.
- [17] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4):541-547.  
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. *Soils*, 2012, 44(4):541-547.
- [18] 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.
- [19] 陈钊, 高远, 张艳玲, 等. 不同土壤改良剂对烟草吸收镉的影响[J]. 烟草科技, 2013(3):72-76.  
CHEN Zhao, GAO Yuan, ZHANG Yan-ling, et al. Effects of soil amendments on cadmium uptake of tobacco plants[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2013(3):72-76.
- [20] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):193-198.  
LIU A-mei, XIANG Yan-ci, TIAN Dai-ke, et al. Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5):193-198.
- [21] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2851-2858.  
WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Effects of biochar and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars with low cadmium accumulation[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11):2851-2858.
- [22] 张哈芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2713-2717.  
ZHANG Han-zhi, HUANG Yun, LIU Gang, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seedling stage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11):2713-2717.
- [23] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1569-1574.  
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xue-huan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8):1569-1574.
- [24] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4):52-56.  
LI Fei-li, LIU Cong-qing, YANG Yuan-gen, et al. Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and capsicum (*Capsicum frutescens* L. var. longum Bailey) system in guiyang, Southwest China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(4):52-56.
- [25] 崔立强. 生物黑炭抑制稻麦对污染土壤中 Cd/Pb 吸收的试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.  
CUI Li-qiang. An experiment study on reducing cadmium and lead uptake from polluted soil by rice and wheat with biochar amendment[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2011.
- [26] Zheng R L, Cai C, Liang J H, et al. The effect of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7):856-862.