

生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和 重金属 Cu、Cd 有效性影响

陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 周乾聪, 陈盈池, 潘晓华, 曾勇军

(江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 针对南方稻田土壤酸化严重, 导致养分流失有毒重金属活化, 严重影响稻米质量安全的重大现实问题。以水稻秸秆和谷壳等农业废弃物为原料制备生物炭(分别记为 RSC 和 RHC), 研究不同原料生物炭对酸化土壤改良及其对重金属有效性的影响。设置 3 个生物炭用量(0, 20, 50 g/kg, 分别记为 CK、C1、C2), 4 种土壤酸化水平(pH 4.01, 4.25, 4.33, 4.58, 分别记为 L1、L2、L3、L4), 生物炭与重金属污染土壤共同培养 60 天后测定土壤 pH、全氮、有机质、有效磷、速效钾和有效态 Cu、Cd 含量。结果表明: RSC 对酸化土壤 pH 的改良效果明显优于 RHC, 且施炭量越高提高幅度越大, RSC 的 C2 处理使 4 种酸度水平的土壤 pH 分别提高了 0.68, 0.97, 1.29, 1.71 个单位。2 种生物炭均能提高土壤的全氮、有效磷、速效钾和有机质含量, 其中各施炭处理有机质显著提高, 尤以速效钾的增幅最为显著, RSC 对 4 种养分的提高均优于 RHC。RHC 对土壤有效态 Cu 含量无显著影响; RSC 的 C2 较 C1 处理更能降低土壤中有有效态 Cu 含量, 使 4 种酸度水平的土壤分别降低了 13.62%, 6.57%, 4.36%, 7.88%。RHC 处理的 L3、L4 土壤中有有效态 Cd 含量显著降低, 最大分别降低了 13.79%, 19.23%。RSC 使 4 种酸度土壤有效态 Cd 含量最大分别降低了 20.00%, 25.81%, 20.69%, 19.23%。相关分析表明, 土壤 pH 与有效态重金属含量呈显著负相关关系。水稻秸秆炭用于改良酸化土壤、降低重金属 Cu 和 Cd 有效性的效果更佳, 且降低污染土壤中 Cd 的有效性较 Cu 好; 生物炭对酸化程度越低的土壤 pH 和有效磷含量的提高以及有效态 Cd 含量的降低效果较好, 而有效态 Cu 含量的降低效果则在酸化程度越高的土壤中表现更佳; 土壤 pH 是生物炭调控重金属 Cu、Cd 有效性的主要影响因素。

关键词: 生物炭; 土壤酸化; 土壤性质; 重金属有效性; Cu; Cd

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0358-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.051

Effects of Biochar on the Properties and the Availability of Cu and Cd in Paddy Soil with Different Acidification Levels

CHEN Le, ZHAN Siwei, LIU Mengjie, ZHOU Qiancong,

CHEN Yingchi, PAN Xiaohua, ZENG Yongjun

(Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang 330045)

Abstract: Aiming at the problems of rice safety and quality caused by the activation of toxic heavy metals as a result of soil acidification in paddy soil of southern China, rice straw and husk were selected to produce biochar (reported as RSC and RHC respectively), the effects of different feedstocks biochar on the improvement of acidified soil and the availability of heavy metals were studied. Three biochar application rates (0, 20, 50 g/kg; CK, C1, C2), four soil acidification levels (pH 4.01, 4.25, 4.33, 4.58; L1, L2, L3, L4) were used in this study. The soil pH, total nitrogen, organic matter, available phosphorus, available potassium, and available Cu and Cd contents were determined after incubation for 60 days. Results showed that the RSC improved the pH of acidified soil significantly better than RHC, and the higher the amount of biochar applied, the greater the range increased. The C2 treatment of RSC increased the pH of four acidity levels soils by 0.68, 0.97, 1.29 and 1.71 units, respectively. Two biochar both could increase the contents of total nitrogen, available phosphorus, available potassium, and organic matter in soil. Among them, organic

收稿日期: 2019-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(31660372); 江西省水稻产业体系专项(JXARS-02-03); 江西省重点研发计划项目(20161ACF60013); 江西省青年科学家项目(20153BCB23015); 中青年科技创新领军人才专项(赣科计字[2018]175号)

第一作者: 陈乐(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail: 1591067230@qq.com

通信作者: 曾勇军(1978-), 教授, 博士, 主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail: zengyj2002@163.com

matter was significantly increased in all treatments, especially available potassium, and RSC was superior to RHC on enhancing the nutrients. RHC had no significant effect on soil available Cu content. C2 of RSC could reduce soil available Cu content more effectively than C1 treatment, and reduced the four acidity levels soils by 13.62%, 6.57%, 4.36%, and 7.88%, respectively. Available Cd content in L3 and L4 soils treated with RHC decreased significantly, with a maximum of 13.79% and 19.23% respectively. RSC reduced the maximum content of available Cd in four acidity soils by 20.00%, 25.81%, 20.69%, and 19.23%, respectively. Correlation analysis showed a significant negative correlation between soil pH and available heavy metal content. Rice straw biochar was more effective in improving acidified soils and decreased the availability of heavy metals such as Cu and Cd, and removed the available Cd in contaminated soils better than that of available Cu. Biochar had better effects on the increase of soil pH and available phosphorus content and the decrease of available Cd content in the soil with lower acidification degree, while the decrease of available Cu content was better in the soil with higher acidification degree. Soil pH is the main factor affecting the availability of heavy metals such as Cu and Cd regulated by biochar.

Keywords: biochar; soil acidification; soil properties; availability of heavy metals; Cu; Cd

以江西为代表的南方地区是我国水稻的主产区,在保障国家粮食安全方面有着举足轻重的作用。然而该区农田土壤酸化问题极其严重,江西省有 92.3% 的农田土壤平均 pH 低于 5.5, 低于 5.0 的占有 18.7%^[1]。已有研究^[2-3]表明,农田土壤酸化的主要原因是长期而过多的使用化肥,土壤中全氮和碱解氮含量与 pH 呈极显著负相关性,土壤每增加 100 mg/kg 全氮和碱解氮含量会导致水稻土 pH 下降大约 0.1 个单位^[4]。酸化后的土壤 H⁺ 浓度升高,置换出盐基离子流失,土壤肥力不断下降^[5-6],同时也会活化土壤重金属^[7]。许中坚等^[8]研究发现, pH 4.5 的酸雨使红壤 Cu 和 Cd 的累积释放量分别增加了 3.45%~82.23%、4.87%~81.34%, pH 3.5 的酸雨使其分别增加了 3.11%~258.89%、8.44%~630.84%。有效态重金属容易被植物吸收累积,导致农产品质量安全问题。

近年来,生物炭用于土壤改良及重金属污染土壤修复得到了国内外广泛关注,并获得了一些进展^[9-12]。袁金华等^[13]认为,生物炭一般呈碱性,具有较高的 pH 和 CEC,本身含有丰富的矿质元素且有巨大表面积和发达的孔隙结构,因此可以通过提高土壤 pH 和养分以及改善物理性状来改良酸性土壤。现有研究表明,生物炭在调控重金属有效性方面起着重要作用, Yuan 等^[14]研究表明,生物炭处理的土壤中, Cd、Pb 和 Zn 的有效态含量显著降低; Beesley 等^[15]研究发现,在土壤中施用生物炭可以大大减小土壤毛管水中 Zn 和 Cd 的浓度; Park 等^[16]研究表明,施用生物炭可显著减小 Cd、Cu、Pb 的 NH₄NO₃ 提取态浓度和在印度芥菜中的累积; Karami 等^[17]研究表明,生物炭可有效降低黑麦草体内的 Cu 浓度; Cui 等^[18]研究发现,施用生物炭可大幅减少水稻和小麦对 Cd 的吸收。但同时,也有学者认为生物炭对土壤中某些重金属具有活化作用,侯艳伟等^[19]研究表明,施用木屑生

物炭和鸡粪生物炭可以升高 Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 的生物有效性。由此可见,围绕生物炭改良酸性土壤和调控重金属的有效性研究者们做了较多的研究,但生物炭对不同酸化水平稻田土壤的性质和重金属有效性的影响有怎样的差异,以及不同重金属在不同酸化水平条件下对生物炭的响应是怎样的变化,还不清楚。

南方稻田土壤不仅酸化问题严重,而且重金属本底值较高,造成土壤酸化退化,有毒重金属活化,严重影响稻米质量和稻米品质。针对这一问题,本研究以水稻秸秆和谷壳等农业废弃物为原料制备生物炭,典型重金属污染稻田土壤作为供试土壤,研究不同原料生物炭对不同酸化水平土壤的改良及重金属有效性的影响,明确生物炭对不同酸化水平稻田土壤的改良有何差异,探明不同重金属在不同酸化水平条件下对生物炭的响应是怎样的变化,并探明影响生物炭调控重金属有效性的土壤化学性质有哪些,以期对南方地区防控稻米重金属污染、提升稻田土壤质量、促进水稻秸秆等农业废弃物的循环利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2018 年 5—7 月在江西农业大学作物生理生态与遗传育种重点实验室进行土壤培养试验。采取乐平市名口镇戴村典型重金属污染稻田土壤(表层 0—20 cm, 粉砂质壤土)作为供试土壤, pH 为 6.3, 有机质含量为 15.15 g/kg, 全氮含量为 1.02 g/kg, 有效磷含量为 22.17 mg/kg, 速效钾含量为 133.51 mg/kg, 总铜含量为 179.12 mg/kg, 总镉含量为 0.73 mg/kg。供试生物炭为水稻秸秆炭(RSC)和谷壳炭(RHC), 待水稻秸秆和谷壳含水量降至 16% 以下时进行粉碎, 将粉碎后样品压实填满 300 mL 陶瓷坩埚在马弗炉中热解炭化成生物炭(热解温度

为 700 °C,时间为 2 h,升温速率为 20 °C/min),2 种生物炭基本理化性质见表 1。

表 1 供试生物炭理化性质

生物炭	灰分/ %	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	pH	铜/ (mg · kg ⁻¹)	镉/ (mg · kg ⁻¹)
RHC	30.65	6.8	4.22	490.59	10.05	29.66	0.09
RSC	36.81	10.7	4.29	510.38	10.63	42.08	0.25

1.2 试验方法

设置 3 个生物炭用量(0, 20, 50 g/kg, 分别记为 CK、C1 和 C2), 4 种土壤酸化水平(L1、L2、L3、L4, 采用 H₂SO₄ 调节; 酸度调节后的土壤实际 pH 平均值分别为 4.01, 4.25, 4.33, 4.58)。培养用土全过 2 mm 筛, 用量均为 300 g, 与折算后的 2 种生物炭分别装入 500 mL 塑料杯, 每个处理 3 次重复, 每隔 1 天调节 1 次水分, 使土壤含水量保持在 70% 左右。培养 60 天后, 取出处理土壤样品风干并过筛, 测定土壤 pH、全氮、有机质、有效磷、速效钾和有效态 Cu、Cd 含量。

1.3 测定项目与方法

生物炭基本理化性质测定: pH 测定参考《GB/T 12496.7—1999 木质活性炭试验方法 pH 的测定》^[20] 方法; 有机碳含量采用油浴加热—重铬酸钾容量法^[21] 测定; 粗灰分测定采用直接灰化法^[20]; 生物炭 N、P 含量用 H₂SO₄—H₂O₂ 消化, 然后用半微量凯氏法定氮, 用钼锑抗比色法^[21] 测磷。

土壤基本理化性状分析: pH 采用去 CO₂ 蒸馏水 2.5 : 1 水土比浸提, PHSJ—3FX 型 pH 计测定^[22]; 全氮采用半微量凯氏法测定; 有效钾采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提, 火焰光度法^[23] 测定; 有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗比色法测定; 土壤有机质含量采用油浴加热—重铬酸钾容量法^[21] 测定。

土壤有效态 Cu 和 Cd 含量: 采用 DTPA 浸提剂 (0.005 mol/L DTPA+0.01 mol/L CaCl₂+0.1 mol/L TEA) 提取, 最后采用原子吸收光谱火焰法和石墨炉法测定 (iCE 3000, Thermo SCIENTIFIC)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 DPS 7.5 软件对试验数据进行统计分析并绘图。

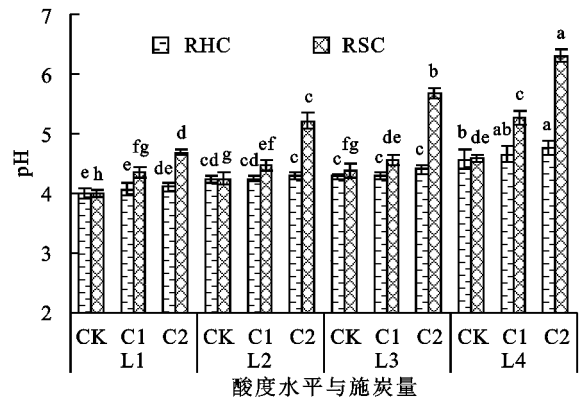
2 结果与分析

2.1 生物炭对不同酸化水平稻田土壤 pH 和养分含量的影响

2.1.1 生物炭对不同酸化水平稻田土壤 pH 的影响

由图 1 可知, 同一酸度水平上与 CK 相比, 2 种生物炭均能提高土壤 pH, 且施炭量越高提高幅度越大, RSC 的作用效果明显优于 RHC。同一酸度水平上(L1、L2、L3)RHC 处理的土壤 pH 无显著差异, 只有酸度水平为 pH 6.0 的 C2 处理显著提高了土壤 pH 0.19 个单位。与 CK 相比, 同一酸度水平上 RSC

的 C1 和 C2 处理均可以显著提高土壤的 pH, 其中 C2 处理最为明显, 使 4 种酸度水平的土壤 pH 分别提高了 0.68, 0.97, 1.29, 1.71 个单位, 生物炭对酸化程度越高的土壤 pH 提高幅度越小。



注: 图中误差线为标准偏差; 图柱上方不同小写字母表示在 0.05 水平上同一种生物炭的处理中差异显著。下同。

图 1 生物炭对不同酸化水平土壤 pH 的影响

2.1.2 生物炭对不同酸化水平稻田土壤全氮、有效磷和速效钾含量的影响 由表 2 可知, 2 种生物炭均能提高土壤的全氮、有效磷和速效钾含量, 尤其是速效钾的增幅特别明显, RSC 对 3 种养分的提高均优于 RHC。从不施炭 CK 处理发现, 较低的土壤 pH 会提高土壤中磷的有效性。同一酸度水平上, RHC 总体表现施炭量为 C2 才能显著提高土壤全氮和有效磷含量, 使 4 种酸度土壤(L1、L2、L3、L4)的全氮含量分别提高了 12.5%, 21.28%, 5.26%, 19.28%, 有效磷含量分别提高了 14.78%, 17.22%, 19.44%, 25.93%; RHC 的 C1 和 C2 处理均能显著提高土壤速效钾含量, 其中 C2 处理提高更为显著, 使 4 种酸度水平的土壤分别提高了 2.72, 3.06, 3.25, 2.70 倍。总体来看, RSC 的各施炭量均能显著提高土壤的全氮、有效磷和速效钾含量, 尤以 C2 处理提高更为明显, 与 CK 相比使 4 种酸度土壤(L1、L2、L3、L4)的全氮含量分别提高了 43.43%, 28.43%, 18.1%, 25.0%, 有效磷含量分别提高了 6.59%, 21.78%, 27.46%, 56.59%, 速效钾含量分别提高了 12.34, 10.58, 11.36, 11.19 倍。

2.1.3 生物炭对不同酸化水平稻田土壤有机质含量的影响 由图 2 可知, 同一酸度水平上与 CK 相比, 2 种生物炭均能显著提高土壤有机质含量, 且施炭量越多提高幅度越大, RSC 的提高幅度明显大于 RHC。RHC 使 4 种酸度土壤(L1、L2、L3、L4)的有机质含量提

高范围分别为 60.13%~105.72%, 40.56%~97.68%, 范围分别为 63.6%~118.85%, 46.95%~98.08%, 49.55%~101.48%, 62.92%~102.83%, RSC 的提高 76.91%~125.94%, 50.49%~115.4%。

表 2 生物炭对不同酸化水平土壤全氮、有效磷和速效钾含量的影响

处理	RHC			RSC		
	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
CK	0.96cd	31.13bc	113.11c	0.99g	32.3b	115.96e
L1 C1	1.02bc	32.74b	239.98b	1.12def	32.87ab	819.14d
L1 C2	1.08ab	35.73a	420.66a	1.42a	34.43a	1546.36a
CK	0.94cde	27.93de	108.33c	1.02fg	26.81d	129.46e
L2 C1	1.02bc	29.75cd	253.65b	1.17cd	29.44c	819.80d
L2 C2	1.14a	32.74b	440.35a	1.31ab	32.65ab	1499.7bc
CK	0.95cd	24.69fg	101.48c	1.05efg	24.73e	124.74e
L3 C1	0.96cd	26.64ef	243.70b	1.16cde	26.81d	826.37d
L3 C2	1.00bcd	29.49cd	431.49a	1.24bc	31.52b	1542.12ab
CK	0.83e	19.40h	113.97c	0.96g	20.27f	122.61e
L4 C1	0.91de	22.30g	245.16b	1.11def	25.86de	827.54d
L4 C2	0.99bcd	24.43fg	422.03a	1.20bcd	31.74b	1494.57c

注:同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

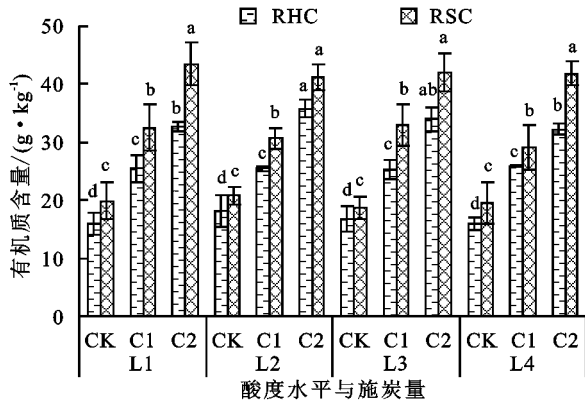


图 2 生物炭对不同酸化水平土壤有机质含量的影响

2.2 生物炭对不同酸化水平稻田土壤有效态 Cu 和 Cd 含量的影响

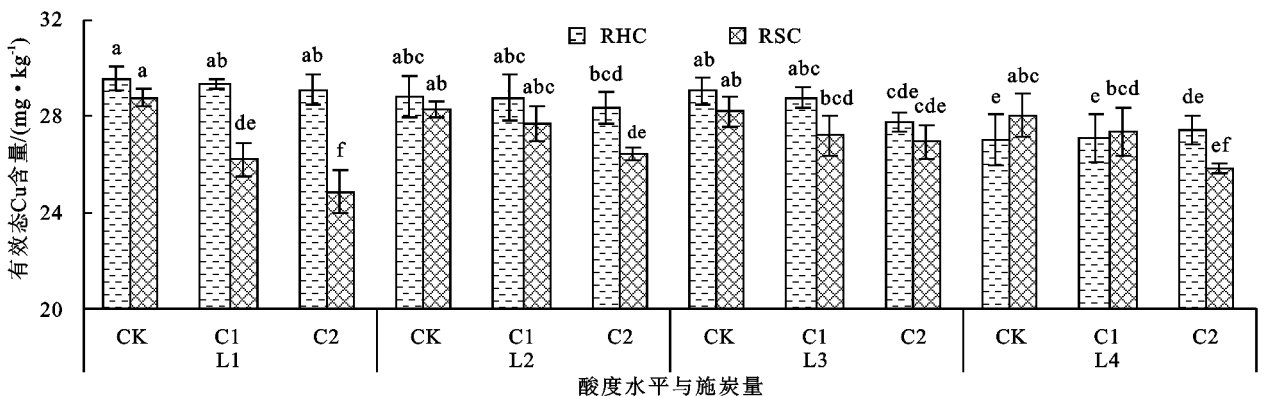


图 3 生物炭对不同酸化水平土壤有效态 Cu 含量的影响

2.2.2 生物炭对不同酸化水平稻田土壤有效态 Cd 含量的影响 由图 4 可知, pH 较低的土壤中有有效态 Cd 含量更高。与 CK 相比, 同一酸化水平上 2 种生物炭均能降低土壤中有有效态 Cd 含量, 且施炭量越高降低幅度越大, RSC 的降低效果优于 RHC。RHC 处理的 L1 土

2.2.1 生物炭对不同酸化水平稻田土壤有效态 Cu 含量的影响 从不施炭 CK 处理发现(图 3), 较低的土壤 pH 会提高土壤中 Cu 的有效性。与 CK 相比, 同一酸化水平上 2 种生物炭均能降低土壤中有有效态 Cu 含量, 且施炭量越高降低幅度越大, RSC 的降低效果明显优于 RHC。

总体上, RHC 对土壤有效态 Cu 含量无显著影响。RSC 处理的酸化水平为 L1 土壤, C1 和 C2 处理均能显著降低有效态 Cu 含量, 分别降低了 8.9%, 13.62%, 而在另外 3 种酸化水平(L2、L3、L4)土壤中只有 C2 处理才能显著降低有效态 Cu 含量, 分别降低了 6.57%, 4.36%, 7.88%。酸化程度越高的土壤中, 生物炭降低土壤 Cu 有效性的效果更好。

壤中处理间有效态 Cd 含量无显著差异, 在 L2 土壤中 C2 处理显著降低 10% 有效态 Cd 含量; 而在 L3、L4 土壤中 C1 和 C2 处理均显著降低有效态 Cd 含量, C1 处理分别降低了 3.45%, 7.69%, C2 处理分别降低了 13.79%, 19.23%。RSC 则总体上表现为 2 个施炭量处理均能显

著降低土壤中有有效态Cd含量,其中C2处理降低效果更明显,使4种酸度(L1、L2、L3、L4)土壤分别降低了20.00%,25.81%,20.69%,19.23%。

2.3 土壤化学性质与有效态Cu、Cd含量的相关性分析

由表3可知,2种生物炭处理的土壤中有有效态Cu和Cd含量均与土壤pH呈极显著负相关,说明土壤酸化会提高土壤重金属Cu、Cd的有效性;RSC处理的土壤中有有效态Cu和Cd含量与有机质也呈极显著负相关,说明土壤中的有机质有利于降低重金属Cu、Cd的有效性。

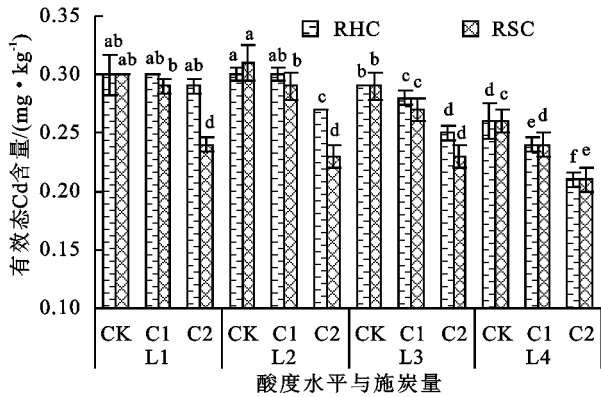


图4 生物炭对不同酸化水平土壤有效态Cd含量的影响

3 讨论

3.1 生物炭对酸性稻田土壤的改良作用

生物炭改良土壤的效果与其原料和用量及所作

表3 土壤化学性质与有效态Cu和Cd含量的相关性系数

生物炭	指标	pH	有机质	全氮	有效磷	速效钾
RHC	有效态Cu	-0.932**	-0.207	0.420	0.711**	-0.230
	有效态Cd	-0.910**	-0.438	0.166	0.522	-0.484
RSC	有效态Cu	-0.521	-0.880**	-0.757**	-0.611*	-0.859**
	有效态Cd	-0.904**	-0.765**	-0.448	-0.243	-0.808**

注: **表示极显著相关($P < 0.01$); *表示显著相关($P < 0.05$)。

不同原料制备生物炭的理化性质有很大的差异,而这决定了生物炭对土壤理化性质的影响。本研究中水稻秸秆炭较谷壳炭更能有效改良酸性土壤、提高土壤养分含量,尤其土壤中有有机质和速效钾含量的提高幅度特别明显。可能的原因是:从生物炭理化性质测定结果中发现水稻秸秆炭的pH、灰分含量和其他元素均高于谷壳炭,所以水稻秸秆炭改良酸性土壤效果更佳。

3.2 生物炭对酸性稻田Cu、Cd有效性的影响

本研究发现,酸化越严重,越容易活化土壤重金属Cu和Cd,使其有效态含量明显增加,与众多研究^[8,28-29]结果一致。生物炭用于重金属污染土壤的修复已有大量研究^[11-12]。易卿等^[30]研究表明,用量6%的水稻秸秆炭和樟木炭使土壤中有有效态Cd含量分别降低了47.96%和31.91%;王晓琦等^[31]盆栽试验中,4%玉米炭和商陆炭使低铜土壤有效态铜含量

用的土壤性质有很大的关系。李秋霞等^[24]研究表明,施用生物炭为40 t/hm²时对旱地红壤的改良效果最好,土壤pH、有机碳和阳离子交换量分别提高了7.25%,47.88%,44.61%。许多研究^[23,25-26]都揭示了生物炭能够提高酸性土壤的pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。然而本研究发现不仅如此,生物炭对不同酸化水平的土壤改良程度有差异。生物炭对酸化程度越高的土壤pH提高幅度越小,可能是由于生物炭的碱性物质和盐基离子需要缓冲中和更多土壤中的H⁺,所以在低pH的土壤提高幅度更小。有效磷含量亦表现出相似规律,结合不施炭处理来看,可能原因是酸化程度更高的土壤中有有效磷含量本底值较高。戴中民^[27]研究表明,生物炭对于pH较低的酸化土壤,主要作用于土壤酸度的改良,对于pH相对较高的酸化土壤还会影响养分。其中猪粪炭(3%)对3种酸化水平土壤(红砂土、红壤和黄斑田)的pH分别提高了2.58,2.26,1.87个单位。这一变化规律与本研究结果恰恰相反,由此可以假设酸化土壤存在1个临界pH,当土壤pH低于该临界值时,生物炭对酸化程度越低的土壤pH改良越好,反之高于该临界值时改良效果较差。生物炭对不同酸化水平土壤中的有机质、全氮和速效钾含量的影响无明显规律,说明这3种养分对土壤pH并不敏感,亦或是需要更长的作用时间。

分别降低了21.9%和45.2%,使高铜土壤有效态铜含量分别降低了41.9%和53.8%。更多的是进行了不同生物炭对土壤重金属有效性的研究,而本试验中还对不同酸化水平的重金属污染稻田土壤就行了系统比较研究。本研究发现,生物炭对酸化程度越低的土壤有效态Cd含量的降低效果较好,而有效态Cu含量的降低效果则在酸化程度越高的土壤中表现更佳,且修复Cd的效果较Cu好,说明生物炭对Cu和Cd的吸附固定可能存在竞争关系。生物炭降低土壤重金属的有效性主要通过吸附固定^[32]和改变重金属在土壤中的形态^[33],即通过本身的孔隙结构和含氧官能团促使土壤中重金属从土壤迁移到生物炭上,以及生物炭促进重金属的有效态向其他稳定的结合态转化。亦有研究^[34]表明,热解温度为700℃制备的水稻秸秆炭,其比表面积和孔隙结构较谷壳炭发达,且水稻秸秆炭的酸式官能团与碱式官能

团比值较高,这可能是本研究中水稻秸秆炭降低重金属有效性的效果较谷壳炭好的原因。

杨兰等^[35]研究表明,土壤中有有效态镉含量与 pH、有机碳呈显著负相关。前人^[36-37]研究认为,生物炭可以通过提高酸性土壤 pH 和有机质含量来降低污染土壤重金属的有效性。本研究中,水稻秸秆炭处理的土壤中有有效态 Cu 和 Cd 含量与 pH、有机质均呈极显著负相关,而谷壳炭处理的土壤中有有效态 Cu 和 Cd 含量只与 pH 呈极显著负相关,综合说明有机质有助于土壤对有效态重金属的吸附固定,但 pH 是控制土壤重金属溶解—沉淀、吸附—解吸等反应的关键因素^[38],因此本研究认为,土壤 pH 是生物炭调控重金属 Cu、Cd 有效性的主要影响因素。

4 结论

生物炭可以改良酸性稻田土壤,提高土壤养分含量,并能降低酸性土壤重金属 Cu 和 Cd 的有效性,且较高用量修复效果更佳;不同原料制备的生物炭对土壤的改良修复效果有差异,本试验中水稻秸秆炭明显优于谷壳炭,且降低有效态 Cd 的效果较 Cu 好。

土壤酸化会促进有效态 Cu 和 Cd 以及有效磷含量的提高,生物炭对不同酸化水平土壤的改良以及重金属修复效果有差异,生物炭对酸化程度越低的土壤 pH 和有效磷含量的提高以及有效态 Cd 含量的降低效果较好,而有效态 Cu 含量的降低效果则在酸化程度越高的土壤中表现更佳。土壤 pH 是生物炭调控重金属 Cu、Cd 有效性的主要影响因素。

参考文献:

[1] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J].中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.

[2] Zeng M F, De Vries W, Bonten L T C, et al. Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7):3843-3851.

[3] 李伟峰,叶英聪,朱安繁,等.近 30 年江西省农田土壤 pH 时空变化及其与酸雨和施肥量间关系[J].自然资源学报,2017,32(11):1942-1953.

[4] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等.中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J].中国农业科学,2015,48(23):4811-4817.

[5] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.

[6] 汪吉东,高秀美,陈丹艳,等.不同 pH 降雨淋溶对原状水稻土土壤酸化的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):118-122.

[7] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2):750-759.

[8] 许中坚,刘广深.模拟酸雨对红壤重金属元素释放的影

响研究[J].水土保持学报,2005,19(5):91-95.

[9] Ahmed A, Kurian J, Raghavan V. Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review [J]. *Environmental Reviews*, 2016, 24(4):495-502.

[10] 王典,张祥,姜存仓,等.生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J].中国生态农业学报,2012,20(8):963-967.

[11] O'Connor D, Peng T Y, Zhang J L, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620:815-826.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):3488-3497.

[15] Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendmems on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6):2282-2287.

[16] 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.

[17] Karami N, Clemente R, Moreno-Jimenez E, et al. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1/3):41-48.

[18] Cui L Q, Li L Q, Zhang A F, et al. Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment [J]. *Bioresources*, 2011, 6(3):2605-2618.

[19] 侯艳伟,曾月芬,安增莉.生物炭施用对污染红壤中重金属化学形态的影响[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2011,42(4):460-466.

[20] 简敏菲,高凯芳,余厚平.不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1757-1765.

[21] Wu Y, Xu G, Shao H B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil [J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2):665-671.

[22] Pandian K, Subramaniyan P, Gnasekaran P, et al. Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(9):1293-1310.

[23] Berihun T, Tadele M, Kebede F. The application of biochar on soil acidity and other physico-chemical prop-

- erties of soils in southern Ethiopia [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2017, 180(3): 381-388.
- [24] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 208-213, 261.
- [25] Wang Z Y, Chen L, Sun F L, et al. Effects of adding biochar on the properties and nitrogen bioavailability of an acidic soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(4): 559-572.
- [26] Bhattacharjya S, Chandra R, Pareek N, et al. Biochar and crop residue application to soil: Effect on soil biochemical properties, nutrient availability and yield of rice (*Oryza sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2016, 62(8): 1095-1108.
- [27] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [28] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 模拟酸雨对土壤重金属镉形态转化的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 566-571.
- [29] 宋文恩, 郭雪雁, 陈世宝, 等. 酸化方式对土壤中铜的形态及生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12): 2343-2349.
- [30] 易卿, 胡学玉, 柯跃进, 等. 不同生物质黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 88-94.
- [31] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 等. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(4): 361-368.
- [32] Uchimiya M, Bannan D I, Wartelle L H. Retention of heavy metals by carboxyl functional groups of biochars in small arTiS range soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(7): 1798-1809.
- [33] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物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.
- [34] 王宏燕, 王晓晨, 张瑜洁, 等. 几种生物质热解炭基本理化性质比较[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(5): 83-90.
- [35] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3562-3574.
- [36] 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.
- [37] 张华伟, 甄华杨, 岳士忠, 等. 水稻秸秆生物炭对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 1068-1074.
- [38] 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.
- (上接第 357 页)
- [29] Nangare D D, Singh Y, Kumar P S, et al. fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 73-79.
- [30] Coyago C E, Melendez M A J, Moriana A, et al. Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 212-221.
- [31] Levin A G, Peres M, Noy M, et al. The response of field-grown mango (cv. Keitt) trees to regulated deficit irrigation at three phenological stages [J]. *Irrigation Science*, 2017, 36(3): 1-11.
- [32] Abdelsattar A, Nuria P S, Najera I, et al. Yield response of seedless watermelon to different drip irrigation strategies under Mediterranean conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 99-110.
- [33] 张小兰, 徐阳, 张金伟, 等. 不同配比的控释肥对日光温室袋培番茄基质养分及其生长、产量和品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 309-314.
- [34] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 109-118.
- [35] Wang Y Z, Zhang X Y, Liu X W, et al. The effects of nitrogen supply and water regime on instantaneous WUE, time-integrated WUE and carbon isotope discrimination in winter wheat [J]. *Field Crops Research*, 2013, 144(1): 236-244.
- [36] Wang H D, Wang X K, Bi L F, et al. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS [J]. *Field Crops Research*, 2019, 240(1): 55-68.
- [37] 马彦霞, 张玉鑫, 王晓巍. 河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 270-276.
- [38] 王振华, 扁青永, 李文昊, 等. 南疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 96-104.
- [39] Bhrguvanshi S R, Adak T, Kumar K, et al. Impact of fertigation regimes on yield and water use efficiency of mango (*Mangifera indica* L.) under subtropical condition [J]. *Indian Journal of Soil Conservation*, 2012, 40(3): 252-256.
- [40] 刘小刚, 张彦, 张富仓, 等. 交替灌溉下不同水氮供给对番茄产量和品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 283-287.