

土壤钾素养分和理化性质对生物炭的响应

姜敏^{1, 2} 顾焯明^{1, 2} 李志国¹ 聂新星¹ 王利¹ 陈防^{1, 3*}

(1 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态实验室, 湖北 武汉, 430074; 2 中国科学院大学研究生院, 北京, 100049; 3 国际植物营养研究所中国项目部, 湖北 武汉, 430074)



摘要: 为了探讨生物炭对土壤不同形态钾含量的影响及其机理, 通过土壤培养试验研究施用生物炭对于我国南方两种土壤(黄棕壤和灰潮土)不同形态钾含量及理化性质差异的影响。结果表明: 1%、2% 和 3% 的生物炭均能提高两种土壤各形态钾含量, 并且各形态钾含量有随生物炭用量的增加而增加的趋势。生物炭提高土壤中不同形态钾含量与生物炭钾的直接贡献作用和土壤理化性质、解钾菌数量的间接影响有关。

关键词: 生物炭; 钾素形态; 土壤类型; 理化性质

钾素是植物生长必需的三大元素之一, 对植物的生长, 发育, 代谢, 抗逆等生理过程都起着重要作用, 是公认的“品质元素”^[1]。按照钾在土壤中的存在形态分为水溶性钾(土壤溶液中钾)、交换性钾、非交换性钾和矿物晶格内的结构钾四种^[2]。其中, 水溶性钾和交换性钾是“易有效态钾”, 这部分钾可被植物直接吸收利用, 但其含量一般不超过全钾含量的 2%, 非交换性钾也仅占全钾的 2.7%–9.4%, 是速效钾的潜在来源, 当速效钾耗竭时释放出来补充速效钾, 是土壤供钾潜力的良好指标, 结构钾中的钾被矿物晶格束缚, 要经过相当长时间的矿化才能释放出来, 并且这种贡献对当季作物是微不足道的, 该部分钾占土壤全钾的 90%–98%^[3]。土壤中这四种形态钾含量并不是一成不变的, 而是存在着动态平衡^[2]。当施入钾肥时, 土壤溶液中钾离子浓度迅速升高, 打破了原有的平衡, 一部分钾会被土壤中 2:1 型粘土矿物固定, 成为非交换性钾^[3]。近几十年随着农业的发展以及一些高产作物品种的出现, 人们越来越倾向于施加化学肥料, 而作为钾素营养重要来源的有机肥施用量越来越少, 导致土壤中钾素的养分平衡被打破。我国是矿物钾素资源贫乏的国家, 大量的钾肥依靠进口。2014 年我国进口钾肥 730 万吨, 为全球最大进口国^[4]。我国南方地区由于高温多雨, 土壤风化淋溶作用强烈, 同时复种指数高, 作物生长量大, 作物收割从土壤中带走大量的有效养分。因此, 基于当前的实际情况, 我国农田施钾要在提高钾肥的利用效率的同时拓宽钾肥资源途径, 挖掘土壤供钾潜力。

生物炭是生物质(如作物秸秆、动物粪便、垃圾废弃物等)在完全或部分缺氧条件下, 以及相对较低的温度($<700^{\circ}\text{C}$)下经热解炭化产生的一类富碳物质, 生物炭可改良酸性土壤 pH; 改善土壤结构; 提高土壤保肥保水能力, 提高微生物丰度和数量; 其作为一种土壤改良剂、肥料缓释载体在农业生产中备受关注^[5]。前人针对于生物炭对土壤钾素养分状态和作物生长方面也开展了大量的研究。Novak 等人在生物炭与肥力较低的土壤混合培养实验中发现土壤有效钙、钾、锰和有机碳因生物炭施入而增加, 其中 2% 生物炭添加量可使土壤有效钾增加 106%^[6]。Liang Feng 等人对于生物炭施入石灰性土壤三年后的作物产量和土壤性质的研究表明, 施入生物炭之后, 土壤速效钾含量提高显著, 四个作物生长季的累计产量有显著提高^[7]。研究表明, 生物炭之所以能提高土壤养分状态主要是由于生物炭含矿质元素丰富并且大部分以可溶性态存在, 而何绪生等人^[8]则认为生物炭作为土壤改良剂提高作物产量和土壤肥力主要是由于其对土壤理化性质及微生物活性的改善有关。因此针对生物炭施入土壤后土壤中各形态钾素含量变化趋势及原因有必要开展相关研究。

黄棕壤和灰潮土是我国南方长江中下游地区农业生产两种主要的土壤类型, 两种土壤理化性质差异较大。因此, 本研究拟通过土壤培养试验来探明不同比例生物炭对两种土壤不同钾素形态含量的影响并且明确生物炭提高土壤钾素有效性可能的原因, 以期生物炭在农业中的应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 9 月到 2016 年 6 月在中国科学院武汉植物园盆栽场进行。黄棕壤和灰潮土取自湖北省武汉市，其主要性状见表 1 生物炭为竹炭，由上海时科生物科技有限公司以竹子为原料 450℃ 条件下厌氧热解制备而成，其基本理化性质见表 2。

土壤类型	pH	有机质 (克/千克)	碱解氮	速效磷	水溶性钾 (毫克/千克)	速效钾	缓效钾
黄棕壤	5.7	27.26	131.6	39.98	51.90	199.88	617.52
灰潮土	7.6	13.31	36.26	11.39	12.97	87.64	457.4

pH	有机碳	N	P	K	Ca	Mg	灰分 (%)
9.48	798.1	2.2	0.6	15.6	2.8	1.7	10.3

1.2 试验设计

本试验共设置两种土壤类型即黄棕壤 (H) 和灰潮土 (G)，每种土壤设置 4 个处理，分别为①对照处理 (CK)，不施用生物炭，②施用 1% 生物炭处理 (HB1 / GB1)，即生物炭占总土壤质量的 1%，③施用 2% 生物炭处理 (HB2 / GB2)，④施用 3% 生物炭处理 (HB3 / GB3)。每个处理设置 5 次重复。试验于 2015 年 9 月 15 号开始，于试验开始后的第 15 天、30 天、60 天、90 天、120 天进行土壤样品的采集，然后进行土壤 pH、有机质、不同形态钾素含量等指标的测定。

1.3 测定项目与方法

将风干土样分别研磨、过筛进行各指标的测定。

土壤的理化性质均按照鲍士旦《土壤农化分析》^[2] 的测定方法进行。土壤 pH 值按水土比 1:2.5 混合震荡沉淀后用 pH 计测定；水溶性钾用去离子水提取、交换性钾使用醋酸铵提取，非交换性钾使用 1mol/L 的热硝酸提取，提取后均用火焰光度法进行测定。有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；土壤水分、温度用 YZQ-310 水分测量仪测定。硅酸盐解钾细菌采用硅酸盐细菌培养基在 28℃ 条件下培养 2-3 天，采用涂布平板法计数。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 对数据进行处理，采用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析，LSD 法进行多重比较并用 Excel 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对土壤不同形态钾素的影响

2.1.1 生物炭施用对土壤水溶性钾含量的影响

由图 1 (a) 和 (b) 可以看出，生物炭处理的黄棕壤和灰潮土水溶性钾含量显著高于对照处理。这说明施用生物炭可以显著提高土壤中水溶性钾含量，并且含量随生物炭施用的比例增加而增加。

施用 1%、2%、3% 生物炭处理的黄棕壤水溶性钾的含量与对照 (46.4 毫克/千克) 相比平均增加了 67.33%、108.56%、155.65%，分别达到了显著性差异。灰潮土施用 1%、2%、3% 的生物炭后，水溶性钾含量比对照 (12.54 毫克/千克) 平均增加了 91.07%、176.08%、263.96%，也达到了显著性差异，且增加幅度大于黄棕壤，但从水溶性钾含量增加的绝对量来看，黄棕壤要明显高于灰潮土。

从不同培养天数土壤水溶性钾含量的动态变化来看，两种土壤施用生物炭后土壤水溶性钾在不同培养时期均有不同程度增加，以在 60 天左右时含量最高，之后则缓慢下降，到 150 天基本达到最低值。产生此现象的原因还需进一步研究，可能与生物炭钾在土壤中的释放速率、土壤理化性质等变化有关。

2.1.2 生物炭施用对土壤交换性钾含量的影响

由图 2 (a) 和 (b) 可以看出，施用生物炭处理的两种土壤交换性钾含量始终要比对照处理高，并且交换性钾含量随着生物炭施用比例的增加而增加。其中，施加 1%、2%、3% 的生物炭使黄棕壤交换性钾的含量比对照 (155.22 毫克/千克) 平均增加 28.77%、45.74%、65.64%，使灰潮土比对照 (78.19 毫克/千克) 平均增加 30.23%、56.7%、80.58%，生物炭对于肥力较低的灰潮土交换性钾含量提高幅度较大但增加的绝对量小于黄棕壤，这与水溶性钾的含量变化趋势是相同的。在整个培养周期中，两种土壤各处理的交换性钾含量变化波动较大但趋势

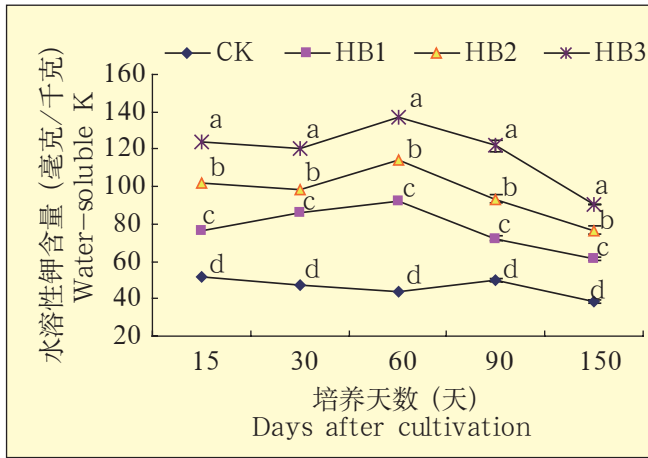


图 1 (a) 施用生物炭后不同培养时期黄棕壤水溶性钾含量

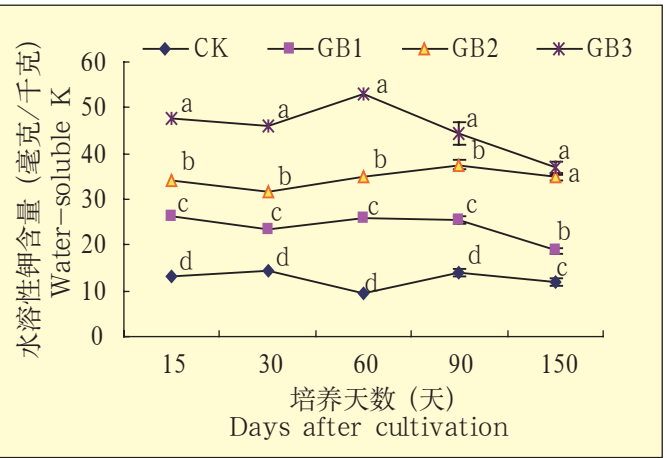


图 1 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土水溶性钾含量

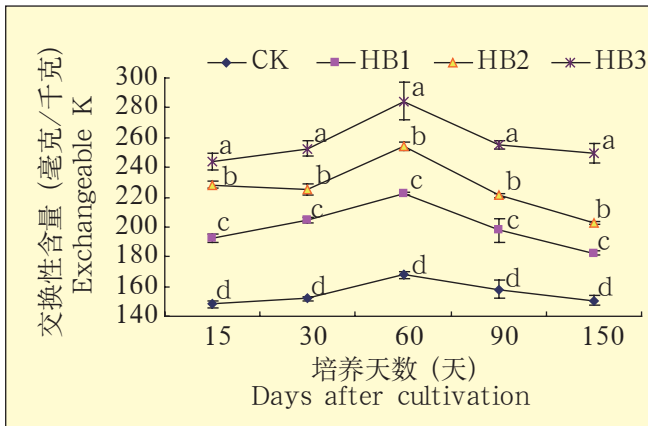


图 2 (a) 施用生物炭后黄棕壤不同培养时期交换性钾的含量

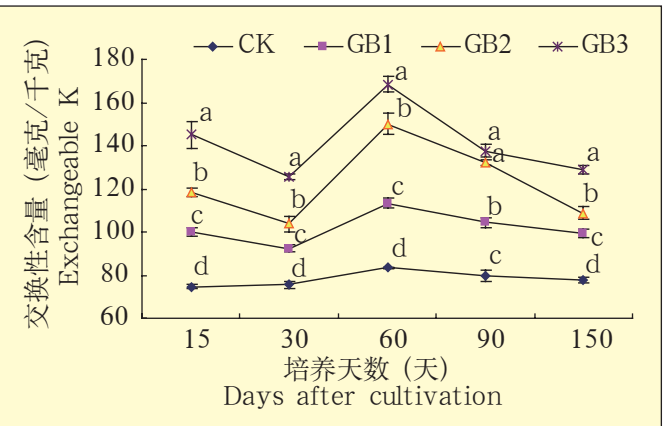


图 2 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土交换性钾的含量

基本一致，都在第 60 天时达到最高值，之后开始下降并在 150 天时达最低点，与培养开始时的含量相比，差异不大。

2.1.3 生物炭施用对土壤非交换性钾含量的影响

由图 3 (a) 可以看出，生物炭添加可不同程度地提高黄棕壤非交换性含量。施加 1%、2%、3% 的生物炭后，土壤非交换性钾的含量要比对照 (615.66 毫克/千克) 平均增加 19.65%、37.15%、56.94%。培养 150 天时，黄棕壤交换性钾含量相比于培养初期均有不同程度地下降。图

3 (b) 表明施加生物炭也可提高灰潮土非交换性钾含量，但是在灰潮土上的响应与黄棕壤不同，不同比例生物炭对灰潮土非交换性钾含量的影响趋势基本一致，并且在第 60 天时各处理非交换性钾含量均显著下降。

2.2 影响两种土壤各形态钾含量的因素

2.2.1 施用生物炭对土壤温度的影响

研究表明，土壤温度升高可以促使土壤钾素向有效态转化^[9]。本研究选取培养开始后的第 8-14 天和第 61-

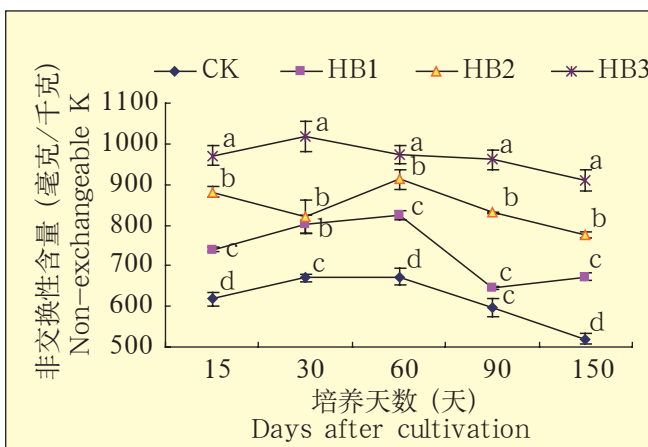


图 3 (a) 施用生物炭后不同培养时期黄棕壤非交换性钾的含量

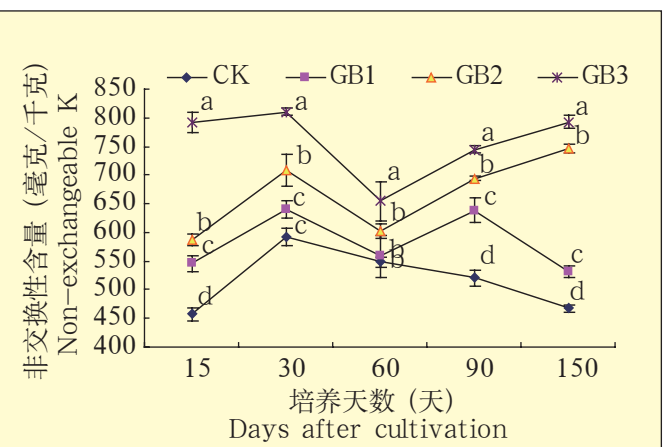


图 3 (b) 施用生物炭后不同培养时期灰潮土非交换性钾的含量

67天两段时间为研究对象研究生物炭对土壤温度的影响。

由图 6a (1) 和 6a (2) 可以看出, 培养开始后的第 8-14 天这段时间内, 施加 3% 生物炭可使黄棕壤温度与不施生物炭处理相比上升 0.75℃-1.19℃。可使灰潮土温度提高 0.5℃-1.19℃。1% 含量生物炭可使黄棕壤温度至少提高 0.38℃, 使灰潮土至少提高 0.25℃。

由图 6b (1) 和 6b (2) 可以看出, 培养开始后的第 61-67 天, 施加 3% 生物炭可以使黄棕壤温度相对于对照提高 0.69℃-1℃不等, 使灰潮土温度提高 1℃-1.5℃不等。同时可以看出该期间, 施加 1% 生物炭含量生物炭的灰潮土和对照相比, 土壤温度基本不变, 而黄棕壤温度却提高了 0.38℃-0.48℃。

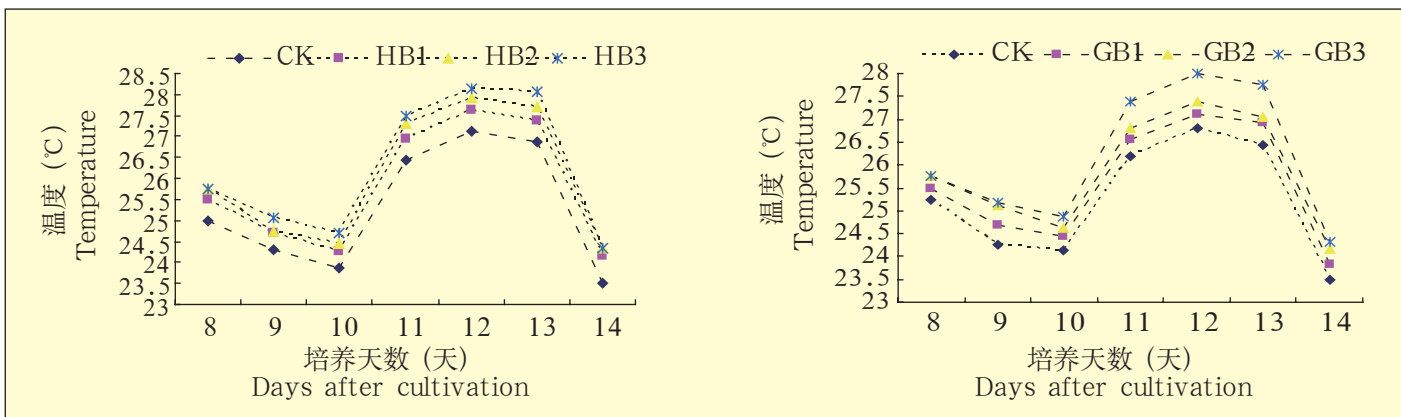


图 6a (1) 生物炭对黄棕壤土温的影响

图 6a (2) 生物炭对灰潮土土温的影响

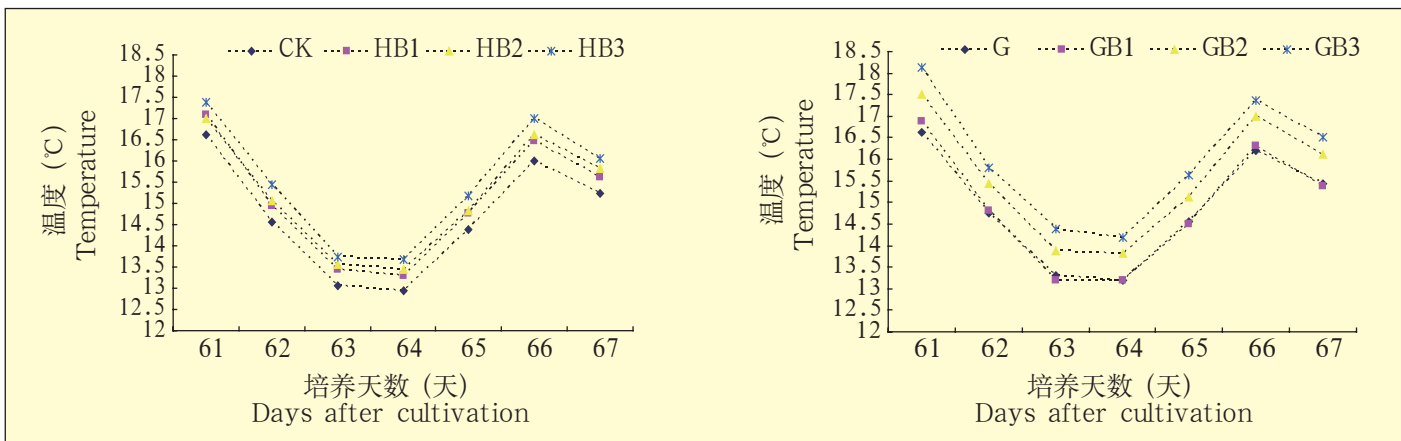


图 6b (1) 生物炭对黄棕壤土温的影响

图 6b (2) 生物炭对灰潮土土温的影响

2.2.2 施用生物炭对土壤 pH 的影响

研究表明, 土壤 pH 升高会提高土壤钾素的固定量, 使溶液中钾离子含量变低, 从而降低土壤钾素的有效性^[10]。

由表 3 和表 4 可知, 添加生物炭可以提高两种土壤的 pH 值, 并且提高程度随生物炭添加量的增加而增加。添加 3%、2%、1% 的生物炭分别使黄棕壤 pH 平均提高了 0.32、0.22、0.1 个单位。添加 3%、2%、1% 的生物炭分别使灰潮土 pH 平均提高了 0.42、0.33、0.24 个单位。只有 3% 生物炭处理使灰潮土 pH 的提高达到显著水平。

2.2.3 施用生物炭对土壤有机质水平的影响

研究表明有机质能够降低土壤的固钾强度, 使土壤中的钾素有效性提高^[9]。本研究中生物炭处理的黄棕壤和灰潮土有机质含量比对照明显提高。并且随着生物炭用量的增加, 有机质水平也随之提高。施用 1%、2%、3% 生物炭处理的黄棕壤有机质含量要比对照处理平均高出 37%、83%、117%。灰潮土有机质含量要比对照平均高出 71%、148%、237%。

2.2.4 施用生物炭对土壤硅酸盐解钾菌的影响

众多研究表明, 硅酸盐解钾菌作为土壤功能细菌的一种, 使土壤中的矿物钾变成可直接被植物利用的水溶

性钾^[11], 使土壤钾素有效性大大提高。

本试验选取整个培养时期微生物活动相对旺盛的时间点 2015 年 10 月 15 日即培养开始后的第 30 天来测定土壤各处理中解钾菌的数量, 结果如表 5 所示: 添加生物炭提高了两种土壤中的解钾菌含量, 但是 1% 生物炭处理的提高效果均不显著。施用 2%、3% 生物炭处理的黄棕壤解钾菌数量与对照相比显著提高, 3% 生物炭处理的黄棕壤解钾菌数量有所下降, 灰潮土中也有同样的趋势。可能是高量生物炭的施用导致短期内

表3 不同比例生物炭对黄棕壤(H)理化性质和硅酸盐解钾菌的影响

处理	pH	有机质(克/千克)	硅酸盐解钾菌($\times 10^3$ cfu/克)
CK	5.62 \pm 0.07c	25.53 \pm 0.57d	3.33 \pm 0.33b
HB1	5.72 \pm 0.05bc	34.87 \pm 1.13c	4.00 \pm 0.73b
HB2	5.84 \pm 0.06ab	46.82 \pm 0.98b	6.17 \pm 0.54a
HB3	5.94 \pm 0.08a	55.39 \pm 1.59a	4.50 \pm 0.85ab

表4 不同比例生物炭对灰潮土(G)理化性质和硅酸盐解钾菌的影响

处理	pH	有机质(克/千克)	硅酸盐解钾菌($\times 10^3$ cfu/克)
CK	7.55 \pm 0.07b	12.73 \pm 0.32d	9.83 \pm 0.60b
GB1	7.79 \pm 0.09ab	21.81 \pm 0.73c	12.00 \pm 1.26b
GB2	7.88 \pm 0.14ab	31.62 \pm 2.21b	16.83 \pm 0.70a
GB3	7.97 \pm 0.13a	42.92 \pm 2.17a	15.50 \pm 0.62a

土壤理化环境条件变化较大,解钾菌的生长受到一定程度的抑制。

3 结论

本研究表明添加生物炭后,两种土壤水溶性钾、交换性钾及非交换性钾的含量迅速上升,并且随生物炭添加量的增加而增加,但是各形态钾含量随时间的推移变化不大。生物炭促进两种土壤各形态钾含量的提高不仅与生物炭中营养元素的直接贡献有关,还与土壤理化性质的改善和微生物活性等间接相关,关于生物炭在不同土壤类型上作用效果差异的原因和机理还有待进一步的研究。



参考文献

- [1] 郭英,孙学振,宋宪亮,等.钾素对棉花生长发育和纤维品质形成影响的研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2006,37(1):141-144.
- [2] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2008:25-114.
- [3] 朱向东,王宏庭.土壤钾素管理研究进展[J].山西农业科学,2013,41(11):1274-1281.
- [4] 陈丽.化肥行业:艰难的2014,变革的2015[J].中国化肥信息,2015,(5),5-8.
- [5] Christopher J. Atkinson, Jean D. Fitzgerald, Neil A. Higgs. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils:a review[J]. Plant Soil, 2010, 337:1-18.
- [6] Jeffrey M. Novak, Warren J. Busscher, David L. Laird, et al. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil[J]. Soil Science, 2009, 174:105-112.
- [7] LIANG Feng, LI Gui-tong, LIN Qi-mei, et al. Crop Yield and Soil Properties in the First 3 Years After Biochar Application to a Calcareous Soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3):525-532.
- [8] 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.
- [9] 梁成华,魏丽萍,罗磊.土壤固钾与释钾机制研究进展[J].地球科学进展,2002,17(5):679-684.
- [10] 聂新星,李志国,张润花,等.生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J].中国农学通报,2016,32(9):27-32.
- [11] Elizabeth P, Miguel S, Maria M B, et al. Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust the south-eastern venezuelan region[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(1):2905-2914.