植物营养与肥料学报 2014,20(3):642 -650
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0316

生物碳对土壤磷素和棉花养分吸收的影响

苏 倩,侯振安*,赵 靓,茹思博,翟 勇,董天宇
(石河子大学农学院资源与环境科学系,新疆石河子 832003)

摘要: 通过两年温室盆栽试验,研究了不同磷肥用量下生物碳对土壤磷素含量、棉花生长和养分吸收的影响。试验以棉花秸秆为原料制备生物碳,制成三种热解温度(450℃、600℃和750℃)的生物碳,分别以BC450、BC600和BC750表示,同时以空白土壤为对照(CK);磷肥(P_2O_5)用量设3个水平0、0.25、0.5 g/kg(分别以P0、P1、P2表示)。研究结果表明,施用生物碳可显著提高土壤磷素含量及其有效性,随着生物碳热解温度的升高,土壤水溶性磷、速效磷及全磷含量均显著增加,且对三种磷素含量的影响表现为水溶性磷 > 全磷 > 速效磷。施用生物碳处理两年棉花的干物质重均显著高于对照,但不同热解生物碳处理对两年棉花干物质重的影响各异。施用生物碳可显著增加棉花养分吸收量,总体表现为750℃ > 600℃ > 450℃。因此,施用生物碳可显著提高土壤磷素含量,促进棉花生长和养分吸收;热解温度是影响生物碳质量的重要因素,生物碳的热解温度越高(450 ~ 750℃),其促进作用越好。

关键词: 生物碳;水溶性磷;速效磷;全磷;棉花;磷素吸收
中图分类号: S143.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)03-0642-09

Effects of biochar on soil phosphorus content and cotton nutrient uptake

SU Qian, HOU Zhen-an*, ZHAO Jing, RU Si-bo, ZHAI Yong, DONG Tian-yu
(*Department of Resources and Environmental Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China*)

Abstract: Influence of biochar on soil phosphorus (P), cotton growth and nutrient uptake under different phosphorus fertilizer application rates was evaluated with a pot experiment in years of 2011 and 2012. Biochar was produced from dried cotton stalks via pyrolysis in oxygen-limited conditions. Three types of biochar produced at 450℃, 600℃ and 750℃ (BC450, BC600 and BC750) were used as the soil organic amendment, and an untreated soil was set as control (CK) in this study. Each soil treatment was applied with three levels of P fertilizer (P_2O_5) as 0, 0.25 and 0.5 g/kg of soil weight (P0, P1 and P2). The experiment was that of 4 × 3 factorial design with four biochar treatments (BC450, BC600, BC750 and CK) and three P application rates (P0, P1 and P2). Cotton was planted for two consecutive growth seasons in 2011 and 2012. The results show that the soil P content and availability are significantly improved with biochar added. With the increase of pyrolysis temperature of biochar, the contents of water-soluble P, available P and total P in soil are increased significantly, and the order of influence of biochar on soil P content is water-soluble P > total P > available P. The dry matter amounts of cotton are significantly higher under the biochar treatments than those under the control (CK) in both 2011 and 2012, but there are differences among three biochar treatments between 2011 and 2012. The P uptake of cotton is also promoted with biochar added. The order of cotton nutrients uptake under three biochar treatments is BC750 > BC600 > BC450. These results suggest that biochar can increase soil P content, and enhance cotton growth and nutrients uptake. Thus, pyrolysis temperature is a vital factor for biochar, and the high temperature (750℃) biochar treatment demonstrates higher soil P, cotton dry matter weight and P uptake compared to the low temperature (450℃) biochar.

Key words: biochar; water-soluble P; available P; total P; cotton; P uptake

收稿日期: 2013-04-22 **接受日期:** 2013-08-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(31160415)资助。
作者简介: 苏倩(1988—),女,新疆阿勒泰人,硕士研究生,研究方向为绿洲农业资源高效利用。E-mail: suqian8807@126.com
* 通信作者 E-mail: hzatyl@163.com

磷参与植物体内多种重要化合物的组成，是植物生长和代谢过程中不可缺少的元素[1]。我国是磷矿资源短缺的国家之一。施用的磷肥一部分被植物吸收，大部分的肥料磷吸附固定残留在土壤里，磷肥的当季利用率仅为 10%～25%。连年大量施用磷肥则会导致土壤磷素积累[2-3]，不仅浪费了磷肥资源，也易造成水体富营养化[4-5]。因此，提高磷肥利用率具有十分重要的意义。

生物碳作为一种惰性有机碳，难以分解，稳定性强。生物碳不是通过矿化作用直接为植物提供养分，而是由于其具有大的比表面积和阳离子交换量，可以吸附和保持土壤养分，减少养分淋失，提高利用率[6-7]。施用生物碳可显著提高土壤阳离子交换量，增加全氮和可利用性磷的含量[6]。生物碳还可以促进植物对 P、K、Ca、Zn 和 Cu 的吸收[7]。Steiner 等[8]研究发现在酸性土壤中，有机肥与生物碳配施可以促进作物的养分吸收，提高产量。Asai 等[9]研究认为，以木屑为原料制备的生物碳与磷肥配施可以提高土壤磷素的有效性。施用生物碳还能够影响土壤磷的溶解性[10]，增加 PO_4^{3-} 在土壤中的溶解，抑制其它离子与可溶性磷的结合，从而提高磷肥利用率[11]。笔者前期的研究也表明，生物碳和磷肥配施可增加土壤 Ca_2-P 含量，有助于提高灰漠土壤无机磷的有效性[12]。生物碳能够改善土壤磷素的有效性，但是其影响机制并不十分清楚[13]。

生物碳会直接影响土壤的结构、通透性和孔隙度，进而影响土壤的呼吸作用、保水能力、土壤微生物以及养分状况[14]。制备生物碳的原料和热解温度都会影响其基本性质和应用效果，通常热解温度越高其稳定性越强[15]。新疆是我国最大的商品棉生产基地，棉花秸秆资源丰富，但关于棉花秸秆制备生物碳及其热解温度对土壤磷素及作物磷素吸收的影响研究还很少。本研究以棉花秸秆为原料，研究不同热解温度生物碳和磷肥配施对棉花生长以及磷素吸收利用的影响，以期为生物碳的合理利用和提高磷素利用率提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2011～2012 年在新疆石河子大学农学院试验站温室进行。供试土壤采自石河子大学农学院试验站，采土深度为耕层 0—20 cm。土壤质地为壤土，有机质 12.43 g/kg，全氮 0.78 g/kg，碱解氮 34.3 mg/kg，速效磷 22.51 mg/kg，速效钾 239.8 mg/kg。生物碳以棉花秸秆为原料，分别在 450℃、600℃和 750℃高温厌氧条件下热解制备[16]。供试作物为棉花。

1.2　试验设计

研究采用温室盆栽试验，磷肥（P_2O_5）用量设三个水平，为 0、0.25、0.5 g/kg（分别以 P0、P1、P2 表示）。生物碳设置四个处理：分别为 450℃生物碳（BC 450）、600℃生物碳（BC 600）和 750℃生物碳（BC 750）；同时，以空白土壤为对照（CK）。生物碳的施用量均为 1%（占干土重）。试验采用完全随机区组试验设计，共 12 个处理，每个处理重复 3 次。

试验装置采用高 60 cm，直径 20 cm 土柱，底部密封。灌溉方式为滴灌，毛管平铺在土柱上方，滴头固定在土柱顶端中心位置，每个土柱由 1 个滴头供水。土柱底部预先装填细砂（粒径 3～5 mm）5 cm，上面覆盖一层细纱网。生物碳在装土前一次性与供试土壤混合均匀后，按照容重 1.30 g/cm^3 分层装土，每 10 cm 一层，装土 50 cm，每个土柱装风干土 20 kg。磷肥使用三料磷肥，全部作基肥，在装土前按照设计用量一次性与生物碳和供试土壤混合均匀。

2011 年 8 月 18 日播种，12 月 17 日结束；2012 年 4 月 18 日播种，8 月 2 日结束。棉花采用干播湿出，播种后滴出苗水 2.5 L/pot。幼苗生长至 2 片真叶时，每个土柱定植 2 株棉花。棉花生长期间采用称重法监测土壤含水量，定期补水，使土壤含水量保持在田间持水量的 60%～90%。2011 年棉花生长期间共灌水 15 次，总灌水量 52 L/pot。2012 年共灌水 18 次，总灌水量 62 L/pot。氮肥（N）用量为 1.5 g/kg，其中 1/3 作基肥，剩余氮肥在棉花生长期间分 5 次随水追施；钾肥（K_2O）用量为 0.25 g/kg，全部做基肥。

1.3　样品采集与测定

试验结束后采集棉花植株样，将棉花植株自基部剪下，用去离子水洗净后分成茎、叶、蕾铃三部分，烘干后称重，测定全氮、磷和钾含量。采集 0—50 cm 土壤样品，以 10 cm 为一层，分 5 层采集，采集后混合各层土壤样品，风干碾碎过筛后，测定混合土样的水溶性磷、速效磷及全磷含量。

植物样品粉碎过筛后，经 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，采用奈氏比色法测定全氮含量，钒钼黄比色法测定全磷含量，火焰光度法测定全钾含量[17]。土壤水溶性磷浸提水土比为 5∶1，25℃恒温振荡 1 h 后，高速离心 10 min（4000 r/min），0.45 μm 滤膜抽滤，钼锑抗比色法测定；速效磷采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸

提—钼锑抗比色法测定；全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定[17]。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤磷素含量的影响

2.1.1 水溶性磷 表1表明，2011和2012年试验结束后，在不施磷肥条件下(P0)，第一年(2011)试验结束后各生物碳处理土壤水溶性磷含量差异不大；但第二年(2012)施用生物碳处理均显著高于对照(CK)，三个施用生物碳处理土壤水溶性磷含量表现为BC600 > BC750 > BC450。中等施磷量下(P1)，第一年仅BC750处理土壤水溶性磷含量显著高于CK，BC450和BC600处理与CK无明显差异；第二年施用生物碳处理均显著高于CK，BC450、BC600和BC750处理土壤水溶性磷含量分别较CK增加了78%、56%和107%。高施磷量下(P2)，第一年BC600和BC750处理土壤水溶性磷含量显著高于CK，但BC450与CK差异不显著；第二年不同生物碳处理间土壤水溶性磷含量与中等施磷量下(P1)相似，BC450、BC600和BC750处理分别较CK增加了42%、37%和77%。

从两年的两因素方差分析结果来看，磷肥、生物碳及二者交互作用对土壤水溶性磷含量的影响均达到显著或极显著水平。总体上，土壤水溶性磷含量随施磷量的增加而显著提高。不同生物碳处理土壤水溶性磷含量则表现为随着生物碳热解温度的提高和施用年限的增加而增加；且生物碳与磷肥配施优于生物碳单独施用。

2.1.2 速效磷 土壤速效磷含量主要受施磷量的影响，随着施磷量的增加土壤速效磷含量显著提高；而施用生物碳对土壤速效磷含量的影响相对较小(表1)。从不同施磷水平下，各生物碳处理土壤速

表1 不同处理对土壤磷含量的影响

Table 1 Effects of different treatments on phosphorus content in soil

处理 Treatment		水溶性磷 Water soluble P (mg/kg)		速效磷 Available P (mg/kg)		全磷 Total P (g/kg)	
磷肥 Phosphorus	生物碳 Biochar	2011	2012	2011	2012	2011	2012
P0	CK	4.37 a	2.73 d	74.27 b	59.30 b	1.22 d	1.23 b
	BC450	4.38 a	12.35 c	76.71 b	60.20 b	1.30 c	1.22 b
	BC600	4.85 a	17.93 a	84.22 a	70.38 a	1.42 a	1.31 a
	BC750	4.38 a	15.97 b	75.22 b	62.15 b	1.39 b	1.30 a
P1	CK	8.86 b	15.14 d	109.24 a	105.76 ab	1.51 c	1.32 d
	BC450	8.52 b	26.93 b	110.56 a	96.89 b	1.61 b	1.35 c
	BC600	9.56 b	23.62 c	113.14 a	117.30 a	1.68 a	1.36 b
	BC750	11.11 a	31.27 a	111.01 a	101.19 b	1.66 a	1.40 a
P2	CK	13.83 b	23.52 c	132.82 ab	127.43 b	1.71 c	1.46 d
	BC450	12.66 b	33.45 b	134.31 ab	135.21 ab	1.87 b	1.51 c
	BC600	15.04 a	32.20 b	147.52 a	147.79 a	1.93 a	1.53 b
	BC750	15.55 a	41.72 a	124.94 b	139.20 ab	1.93 a	1.57 a
两因素方差分析(F值)Two-way ANOVA (F value)							
磷肥 Phosphorous (P)		801.69**	889.65**	310.82**	337.28**	836.30**	579.93**
生物碳 Biochar (BC)		16.67**	372.50**	6.93**	8.41**	710.50**	410.11**
磷肥×生物碳 P×BC		4.46*	14.97**	1.74ns	1.08ns	13.14**	31.36**

注(Note)：数值后不同字母表示同一磷肥用量下不同生物碳处理间差异达到显著水平($P<0.05$) Values followed by different letters mean values significant differences among different treatments under the same P rate ($P<0.05$)；*、**和ns分别表示施磷量、生物碳或二者间交互作用对土壤磷素含量的影响分别达到0.05、0.01显著性水平和影响不显著 Mean soil P contents influenced significantly by phosphorus rate, biochar treatment or their interaction at the 0.05, 0.01 levels, and non-significant.

效磷含量的两年试验结果来看,仅 BC600 处理土壤速效磷含量显著高于 CK,而 BC450 和 BC750 均与 CK 差异不大。

2.1.3 全磷　施用磷肥和生物碳均显著影响土壤全磷含量(表1)。在 P0 条件下,BC600 和 BC750 处理两年的土壤全磷含量均显著高于 CK,而 BC450 处理两年的结果不一致。在 P1 和 P2 条件下,三个施用生物碳处理土壤全磷含量均显著高于 CK,2011 年和 2012 年分别较 CK 增加了 6%～12% 和 2%～8%;且高温热解生物碳处理(BC600、BC750)土壤全磷含量显著高于低温热解处理(BC450)。

2.2　不同处理对棉花干物重的影响

表 2 表明,2011 年除磷肥处理对棉花茎和叶的干物质重影响不显著外,磷肥、生物碳及二者交互作用对棉花各器官及总干物质重的影响均达到极显著水平。2012 年磷肥和生物碳处理对棉花茎和总干物质重影响显著,但对叶和蕾铃的干物质重影响不显著。

在 P0 条件下,2011 年施用生物碳对棉花干物质重影响显著,其中茎的干物质重为 BC600 处理最高,蕾铃和总干物质重整体表现为:BC750、BC600 > BC450 > CK。2012 年仅 BC750 处理棉花总干物质重显著高于 CK,其他处理间差异均不显著。

在 P1 和 P2 条件下,2011 年施用生物碳处理棉花茎、叶、蕾铃和总干物质重均显著高于 CK,三种施用生物碳处理(BC450、BC600 和 BC750)棉花总干重总体表现为随着生物碳热解温度的增加而增加;但 2012 年施用生物碳处理棉花总干重均与 CK 无显著差异。

表 2　2011 年和 2012 年不同处理对棉花植株干物质重的影响(g/pot)

Table 2　Effects of different treatments on the dry matter of cotton in 2011 and 2012

处理 Treatment		2011				2012			
磷肥 Phosphorus	生物碳 Biochar	茎 Stem	叶 Leaf	蕾铃 Boll	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	蕾铃 Boll	合计 Total
P0	CK	4.19 b	5.12 ab	1.79 b	11.10 c	23.95 a	23.47 a	31.62 a	79.04 b
	BC450	4.26 b	6.03 a	2.10 b	12.38 b	26.83 a	24.73 a	31.64 a	83.21 ab
	BC600	5.65 a	4.74 b	3.42 a	13.81 a	26.57 a	24.36 a	32.23 a	83.15 ab
	BC750	4.43 b	5.34 ab	3.92 a	13.69 a	25.87 a	26.08 a	33.80 a	85.74 a
P1	CK	4.15 c	5.06 c	2.22 c	11.43 d	25.66 b	25.93 a	31.09 b	82.69 a
	BC450	4.59 b	4.49 d	3.96 a	13.04 c	29.37 a	24.54 a	30.56 b	84.47 a
	BC600	4.48 bc	6.77 a	3.18 b	14.43 b	26.68 ab	27.36 a	32.40 b	86.44 a
	BC750	5.78 a	5.74 b	3.89 a	15.41 a	26.34 ab	26.36 a	35.59 a	88.30 a
P2	CK	3.60 c	5.09 b	2.90 c	11.59 c	24.94 b	26.97 a	31.72 a	83.63 a
	BC450	4.75 b	4.52 c	4.91 b	14.18 b	27.06 ab	26.51 a	32.39 a	85.97 a
	BC600	5.17 a	5.96 a	2.87 c	14.00 b	30.73 a	24.35 a	32.72 a	87.80 a
	BC750	4.83 b	5.50 ab	5.46 a	15.79 a	31.61 a	27.78 a	30.15 a	89.55 a
两因素方差分析(*F* 值)Two-way ANOVA (*F* value)									
磷肥 Phosphorous (P)		0.97^{ns}	1.79^{ns}	31.93^{**}	20.38^{**}	4.56^{*}	2.44^{ns}	0.21^{ns}	3.55^{*}
生物碳 Biochar (BC)		27.24^{**}	10.99^{**}	49.63^{**}	102.2^{**}	4.10^{*}	1.04^{ns}	0.82^{ns}	4.20^{*}
磷肥×生物碳 P×BC		11.06^{**}	15.10^{**}	11.96^{**}	4.07^{**}	0.09^{ns}	1.16^{ns}	1.13^{ns}	0.07^{ns}

注(Note):数值后不同字母表示同一磷肥用量下不同生物碳处理间差异达到显著水平($P<0.05$) Values followed by different letters mean values significant differences among different treatments under the same P rate ($P<0.05$);*、**和 ns 分别表示施磷量、生物碳或二者间交互作用对土壤磷素含量的影响分别达到 0.05、0.01 显著性水平和影响不显著 Mean soil P contents influenced significantly by phosphorus rate, biochar treatment or their interaction at the 0.05, 0.01 levels, and non-significant.

2.3 不同处理对棉花养分吸收的影响

2.3.1 氮素吸收 2011年两因素方差分析结果表明施磷量($F=3.96$,$P<0.05$)和生物碳($F=12.68$,$P<0.01$)对棉花氮素吸收影响显著。总体上,棉花氮素吸收量随着施磷量的增加而增加。图1表明,在不施磷肥条件下(P0),BC750处理棉花氮素吸收量最大,BC450和BC600处理棉花氮素吸收量与CK无显著差异;中等施磷量下(P1),三种类型生物碳棉花氮素吸收量均与对照无显著差异;而高施磷量下(P2),BC600和BC750处理棉花氮素吸收量均显著高于对照,表现为BC750、BC600 > BC450 > CK。

第二年(2012)两因素方差分析结果表明施磷量($F=99.85$,$P<0.01$)和生物碳($F=45.19$,$P<0.01$)对棉花氮素吸收的影响均达到了极显著水平。在P0条件下,三种类型生物碳棉花氮素吸收量均与对照无显著差异,但BC750处理棉花氮素吸收量显著高于BC450和BC600;在P1条件下,BC600和BC750处理棉花氮素吸收量最高,其次是CK,BC450最低;在P2条件下,三种类型生物碳处理棉花氮素吸收量与CK无显著差异。

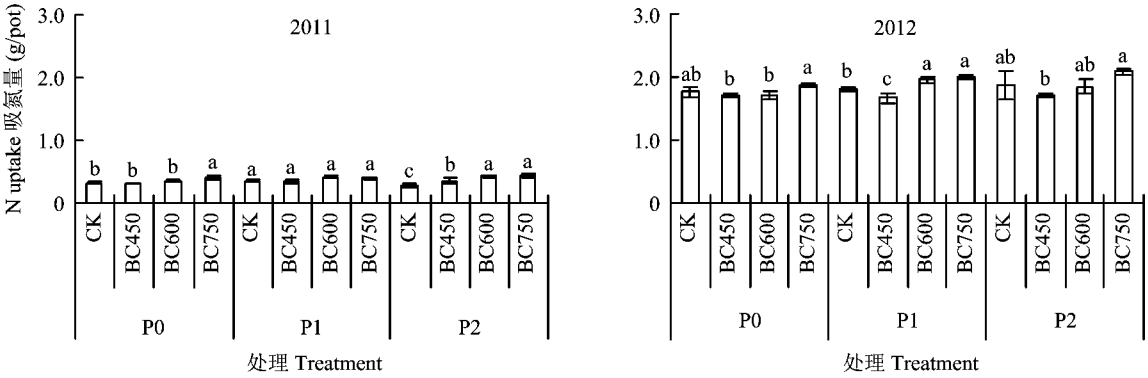

图1 不同处理棉花植株吸氮量

Fig.1 N uptake of cotton under different treatments

[注(Note):柱上不同字母表示同一磷水平下不同生物碳处理间在$P<0.05$水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments under the same P rate ($P<0.05$).]

2.3.2 磷素吸收 2011年两因素方差分析结果表明,施磷量($F=52.38$,$P<0.01$)和生物碳($F=20.21$,$P<0.01$)对棉花磷素吸收影响极显著。总体上,棉花磷素吸收量随着施磷量的增加显著增加。图2显示,在不施磷肥条件下(P0),BC450处理棉花磷素吸收量与CK差异不大,BC600与BC750处理棉花磷素吸收量较CK分别增加了48%和40%;中等施磷量下(P1),三种类型生物碳棉花磷素吸收量均显著高于对照,BC450、BC600和BC750较CK分别增加了18%、26%和40%;而高施磷量下(P2),仅BC750处理棉花磷素吸收量显著高于CK,BC450和BC600处理均与CK差异不显著。

与第一年(2011)相似,第二年(2012)施磷量和生物碳对棉花磷素吸收的影响也均达到了极显著水平($P<0.01$)。总体上,棉花磷素吸收量随着施磷量的增加显著增加;不同生物碳处理表现为750BC > 600BC > 450BC > CK。在P0条件下,仅BC750处理棉花磷素吸收量显著高于对照(CK),BC450、BC600与CK差异不显著;在P1条件下,BC750处理棉花磷素吸收量最高,其次是BC600,分别较CK增加26%和15%,但BC450处理与CK差异不显著;在P2条件下,BC450、BC600和BC750均显著高于CK,分别较CK增加了18%、22%和39%。

2.3.3 钾素吸收 不同处理对棉花钾素吸收的影响如图3。2011年两因素方差分析结果表明施磷量($F=4.79$,$P<0.05$)和生物碳($F=47.48$,$P<0.01$)对棉花钾素吸收影响显著。总体上,棉花钾素吸收量随着施磷量的增加显著增加;不同生物碳处理表现为BC750、BC600 > BC450 > CK。在不施磷肥(P0)条件下,BC450处理棉花钾素吸收量与CK差异不大,BC600与BC750处理棉花钾素吸收量较CK分别增加了36%和24%;中等施磷量(P1)和高施磷量下(P2),三种类型生物碳处理棉花钾素吸收量均显著高于对照,BC450、BC600和BC750较CK分别增加了18%~36%、49%~55%和50%~57%。

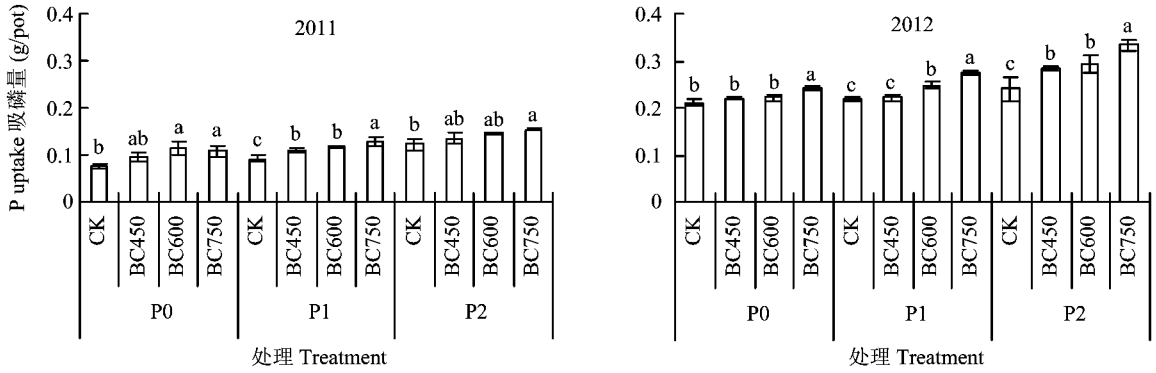

图 2　不同处理棉花植株吸磷量

Fig. 2　P uptake of cotton under different treatments

[注(Note):柱上不同字母表示同一磷水平下不同生物碳处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments under the same P rate ($P<0.05$).]

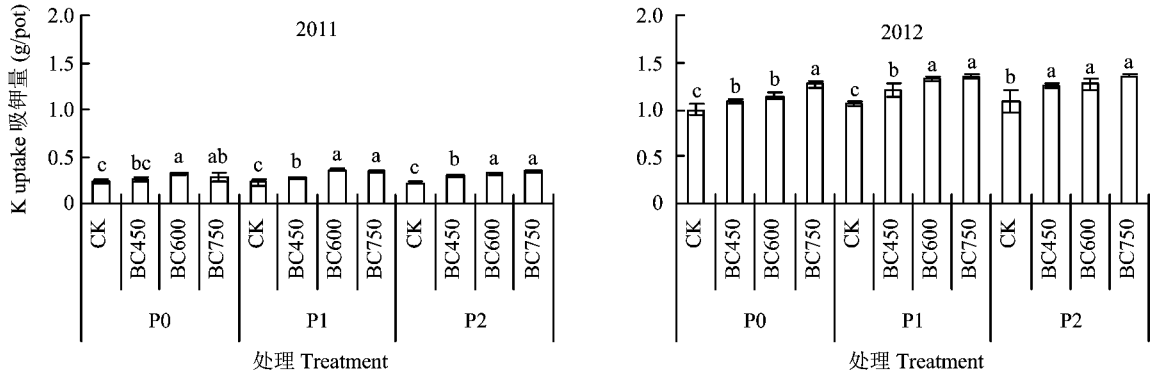

图 3　不同处理棉花植株吸钾量

Fig. 3　K uptake of cotton under different treatments

[注(Note):柱上不同字母表示同一磷水平下不同生物碳处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments under the same P rate ($P<0.05$).]

2012 年不同处理对棉花钾素吸收的影响总体上与 2011 年相似。三种施磷水平下,施用生物碳处理棉花钾素吸收量均显著高于 CK,但三种生物碳处理间存在差异。在不施磷肥(P0)和中等施磷量(P1)条件下,BC750 棉花钾素吸收量最高,其次是 BC600,BC450 最低;但在高施磷量下(P2),三种类型生物碳处理棉花钾素吸收量无显著差异。

3　讨论与结论

根据本研究的两年结果来看,2012 年棉花植株干物质重显著高于 2011 年,主要与棉花种植时间有关。2011 年棉花于 8 月播种,12 月收获,棉花生长阶段整体温度偏低,因此造成棉花生长缓慢,干物质重较低,从而影响了棉花植株对氮、磷、钾的吸收。

生物碳施入土壤中后有利于吸附和保持养分,并提高养分利用率,改善微生物环境,从而提高土壤肥力,增加作物产量[16,18]。本研究结果表明在不同施磷水平下,施用生物碳均可显著提高土壤水溶性磷、速效磷和全磷含量,且对三种磷素的影响大小为水溶性磷 > 全磷 > 速效磷。Parvage 等[19]研究认为,小麦秸秆生物碳可以作为水溶性磷的来源,不同生物碳用量对土壤水溶性磷含量影响存在差异,其中 1% 施用量土壤水溶性磷含量最高。Glaser 等[6]和 Lehmann 等[7]研究也表明热带土施用生物碳后土壤可提取磷含量显著增加。这与本研究的结果基本一致。生物碳具有很强的吸附作用,减少了磷素养分的淋洗损失。本研究未监测土壤磷素的淋洗,但有研究认为生物碳表面的含氧官能团和金属

离子(Fe^{3+}、Al^{3+}、Ca^{2+}、Mg^{2+})可通过配位交换和吸附作用保持PO_4^{3-},从而显著降低土壤渗滤液的磷浓度[20]。有研究表明,施用生物碳后通过增加阴离子代换量或者影响阳离子活性来提高磷的有效性[18,21],可以有效减少铁、铝氧化物等对可溶性磷的吸附。

甘海华等[22]研究表明,有机碳与酸性土壤P的吸附量呈显著负相关,与P的解吸量呈显著正相关;Asai等[9]研究表明,以木屑为原料制备的生物碳与磷肥配施可以提高酸性土壤磷素的有效性。生物碳可减少酸性土壤水铁氧化物表面磷的吸附,而且水铁氧化物与生物碳混合后,其吸附磷的解吸率也显著提高。因此,施用生物碳可以降低酸性土壤磷的吸附,提高磷素利用率[13]。目前关于生物碳对石灰性土壤磷素吸附解吸特性影响的研究还很少,石灰性土壤中粘粒和碳酸钙含量是磷吸附的主要载体,而全磷和速效磷含量则对磷的吸附具有负效应[23]。夏海勇和王凯荣[24]研究认为,随有机碳含量的提高,石灰性黄潮土和砂姜黑土磷的吸附位点和数量先增加后减少,吸附结合强度亦先增强后减弱。生物碳是一种惰性有机碳,制备生物碳的原料和温度都会显著影响生物碳中的元素含量和性质。通常热解温度越高,生物碳的C、P、K、Ca、Mg等元素含量越高,吸附性能、离子代换能力和稳定性等也越强[25,26]。本研究结果表明,随着棉花秸秆生物碳热解温度的增加(450℃~750℃),土壤水溶性磷、速效磷和全磷含量均呈增加趋势。Gundale和DeLuca[10]研究也表明,生物碳的可提取磷含量随着热解温度的增加(350℃~800℃)而增加,但温度过高或过低,可提取磷含量减少。

施用生物碳可以保持土壤肥力,改善土壤的化学、生物和物理特性,并显著增加作物产量[27-29]。一般认为,生物碳对作物生长和产量的影响与生物碳的制备原料、热解温度、施用量和施用年限等有关,但大多数研究都认为生物碳可以提高作物的生物量和产量[30]。本研究连续两年试验结果表明在不同磷肥施用水平下,施用生物碳均可以促进棉花生长和磷素吸收,显著提高棉花的生物量和磷素吸收量。Hidetoshi等[20]研究也表明,施用生物碳能改善土壤的渗透压和水稻叶面积指数,提高氮、磷的有效性,增加旱稻产量。Lehmann等[7]研究表明,在铁铝土和人为土壤中添加生物碳可以促进作物磷素养分的吸收,提高生物量。

生物碳具有大量的孔隙结构以及巨大的表面积,且其表面还带有大量的负电荷[18],由于生物碳热解温度不同,调控其表面与结构特征有所差异,吸附能力也有所差别[25]。高温条件下制备的生物碳比低温下制备的生物碳有更高的孔隙度,吸附能力也较强[31]。张继义等[32]研究表明,随着碳化温度的升高(200℃~500℃),秸秆的微孔变化水平加剧,增大了生物碳表面的粗糙度,使得孔道效应更易发挥,进而提高了其吸附性能。本研究中棉花生物量和磷素吸收量均随着棉花秸秆生物碳热解温度(450℃~750℃)的增加而增加,其中施用750℃生物碳的棉花干物质重和磷素吸收量最高。也有研究表明,施用生物碳可显著增加小麦地上部干物质重,且随着生物碳热解温度的升高(450℃~750℃),BC750处理的小麦干物质重明显高于BC450和BC600处理[33],这与本研究的结果相似。Wang等[34]研究认为,生物碳制备过程中磷素可全部回收,且原料的磷素含量和热解温度越高生物碳产品的含磷量也越高,这部分磷素可作为作物的潜在磷源,具有较高的农学效率。因此,虽然本研究两年的试验结果都表明,施用生物碳增加了棉花的磷素吸收量,但其原因是由于添加生物碳增加了磷素供应总量,还是生物碳提高了土壤磷素或磷肥的利用率,还有待进一步研究。

本研究通过温室盆栽试验探讨了不同磷肥用量下三种热解温度(450℃、600℃和750℃)棉秆生物碳对石灰性土壤磷素含量以及棉花生长和养分吸收的影响,结果表明施用生物碳可显著增加土壤水溶性磷、速效磷和全磷含量,提高棉花生物量和养分吸收量,且生物碳的热解温度越高其促进作用越好。但由于试验研究条件与农田实际环境差异较大;同时,试验中磷肥的施用量明显高于一般农田,因此,还需要进一步开展农田条件下,不同热解温度棉秆生物碳对土壤磷素和作物养分吸收影响的研究。

参考文献:

[1] 向万胜,黄敏,李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(6):663-670.
Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 663-670.

[2] 李艾芬,章明奎. 浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):122-127.
Li A F, Zhang M K. Accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in vegetable soils with different plantation

history in northern Zhejiang [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1): 122-127.

[3] 刘建玲, 李仁岗, 张凤华. 栗钙土中磷肥转化及效应的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(3): 206-211.
Liu J L, Li R G, Zhang F H. Transformation of applied phosphorus and yield response of naked oat to P fertilizer in chestnut soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(3): 206-211.

[4] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施磷对黄壤旱地磷库变化及地表径流中磷浓度的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 196-200.
Liu F, Huang C Y, He T B *et al*. Dynamics of upland field P pool under a long-term application of fertilizer P in yellow soil area and their effects on P concentration in runoff[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 196-200.

[5] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
Si Y B, Wang S Q, Chen H M. The run off of farmland nitrogen, phosphorus and water eutrophication[J]. Soils, 2000, 32(4): 188-193.

[6] 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: 219-230.

[7] Lehmann J, Silva J P, Steiner C *et al*. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure, and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249: 343-357.

[8] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J *et al*. Long term effects of manure, charcoal, and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, 291: 275-290.

[9] Asai H, Homma K, Shiraiwa T *et al*. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research, 2010, 111(1-2): 81-84.

[10] Gundale M J, DeLuca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine Douglas-fir ecosystem[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43: 303-311.

[11] Christopher J, Atkinson J D, Fitzgerald N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. Plant and Soil, 2010, 337: 1-18.

[12] 苏倩, 侯振安. 生物碳对新疆灰漠土壤无机磷形态的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(11): 2102-2107.
Su Q, Hou Z A. Effects of biochar on inorganic phosphorus forms in grey desert soil[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(11): 2102-2107.

[13] Cui H J, Wang M K, Fu M L, Ci E. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar[J]. Journal of Soil Sediment, 2011, 11: 1135-1141.

[14] Amonette J E, Joseph S. Characteristics of biochar: micro chemical properties. Chapter 3. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. Earthscan, London, 2009.

[15] Nguyen B T, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40: 846-853.

[16] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463.
Zhang A F, Pan G X, Li LQ. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2459-2463.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Agricultural chemistry analysis of soils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[18] Liang B, Lehmann J, Solomon D *et al*. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of Amertica Journal, 2006, 70: 1719-1730.

[19] Parvage M M, Ulén B, Eriksson J *et al*. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 10: 746-752.

[20] Novak J M, Busshcher W J, Laird D L *et al*. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain soil[J]. Soil Science. 2009, 174: 105-113.

[21] Cheng C H, Lehmann J, Mark H. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence[J]. Geochimica et Cosmochimca Acta, 2008, 72: 1598-1610.

[22] DeLuca H T, MacKenzie M D, Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformations[A]. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. Earthscan, London, 2009. 251-270.

[23] 甘海华, 徐盛荣. 红壤及其有机无机复合体对磷的吸附与解吸规律探讨[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 264-266.
Gan H H, Xu S R. Red soil and its organic-mineral complexes in phosphorus adsorption and desorption[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(6): 264-266.

[24] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1303-1310.
Xia H Y, Wang K R. Effects of soil organic matter on characteristics of phosphorus adsorption and desorption in calcareous yellow fluvo-aquic soil and lime concretion black soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1303-1310.

[25] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 沈学优. 生物碳质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J]. 中国科学·化学, 2008, 6: 530-537.
Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z, Shen X Y. Adsorbent adsorption mechanism of biochar adsorbent to organic pollutants

in water[J]. Scientia Sinica·Chemica, 2008, 6: 530-537.

[26] 程国淡，黄青，张凯松. 热解温度和时间对污泥生物碳理化性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4209-4214.
Cheng G D, Huang Q, Zhang K S. Effect of pyrolysis temperature and duration on production and nutrient properties of sludge biochar [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4209-4214.

[27] Iswaran V, Jauhri K S, Sen A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moony, soybean and pea[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1980, 12: 191-192.

[28] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F *et al*. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, 52: 489-495.

[29] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, Hurtado M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L) increases with biochar additions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43: 699-708.

[30] Major J, Rondon M, Molina D. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. Plant and Soil, 2010, 333: 117-128.

[31] Yu X Y, Ying G G, Kookana R S. Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 8545-8550.

[32] 张继义，蒲丽君，李根. 秸秆生物碳质吸附剂的制备及其吸附性能[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 104-109.
Zhang J Y, Pu L J, Li G. Preparation of biochar adsorbent from straw and its adsorption capability[J]. Transactions of Chinese Society Agricultural Engineering, 2011, 27 (Supp. 2): 104-109.

[33] 马莉，侯振安，吕宁，等. 生物碳对小麦生长和氮素平衡的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(4): 589-594.
Ma L, Hou Z A, Lü N *et al*. Effects of biochar application on wheat growth and nitrogen balance [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(4): 589-594.

[34] Wang T, Camps-Arbestain M, Hedley M *et al*. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars[J]. Plant and Soil, 2012, 357: 173-187.