

生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响

高海英^{1,2}, 何绪生¹, 陈心想¹, 张 雯¹, 耿增超^{1*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.史丹利化肥股份有限公司市场部, 山东 临沭 276700)

摘要:为了促进生物炭研究和农用,采用盆栽试验研究了两种生物炭基氮肥及相应生物炭对土壤部分化学性质、养分状况及作物产量的影响。试验结果表明:施用生物炭基氮肥可显著提高土壤有机碳含量,提高土壤 pH 值、阳离子交换量、土壤速效磷、速效钾和矿质态氮含量,增强土壤保肥能力,促进作物增产。生物炭对土壤化学性质和养分状况虽有一定改善作用,但作物增产效应不明显甚至减产。因此,将生物炭与肥料复合制成生物炭基肥料不但可以保持生物炭改良土壤的功能,还可促进作物生长和增产,有利于生物炭农用效益的提升。

关键词:生物炭;生物炭基硝酸铵;化学性质;养分状况;小麦;糜子;作物产量

中图分类号:S141.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1948-08

Effect of Biochar and Biochar-based Ammonium Nitrate Fertilizers on Soil Chemical Properties and Crop Yield

GAO Hai-ying^{1,2}, HE Xu-sheng¹, CHEN Xin-xiang¹, ZHANG Wen¹, GENG Zeng-chao^{1*}

(1.College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Shanxi Yangling 712100, China; 2.Marketing Dept, Stanley Fertilizer Stock CO., LTD, Shandong Linshu 276700, China)

Abstract: In order to promote research about biochar and its potential use in agriculture, we conducted a pot experiment to study the effect of biochar and two biochar-based N fertilizers on selected soil chemical properties, available nutrient concentrations, and crop yields. The results showed that biochar-based N fertilizer significantly increased soil organic C storage, soil pH, and soil cation exchange capacity. Biochar-based N fertilizer also increased available P, available K, and mineral N concentrations in the soil and enhanced the ability of soil to retain nutrients. Crop yields were also higher in soil treated with biochar-based N fertilizer. Amendment with biochar alone improved soil chemical properties and available nutrient concentrations to some extent; However, biochar amendment had a negative or insignificant effect on crop yield. Overall, combining biochar with N to produce biochar-based N fertilizer can not only make use of the positive effects of biochar on soil function, but also promote crop growth and increase yield. The use of biochar-based N fertilizer will enhance the economic benefits of biochar application to agricultural soils.

Keywords: biochar; biochar-based ammonium nitrate fertilizer; chemical properties; nutrient status; wheat; pearl millet; Crop yield

生物炭(或生物质炭 Biochar-biocharcoal)是近年来在农林、环境、能源等研究领域较为受关注的

新名词^[1-3],是生物质(或生物有机材料)在无氧或低氧环境中高温热裂解后的产物。对生物质炭研究的重视源于对巴西亚马逊河流域中部黑土(*Terra Preta de Indio*)的认识^[4-5],研究发现富含木炭的土壤比临近无木炭土壤具有更高的肥力,且其在土壤中保存已有数百数千年的历史,这一发现激起了科学家研究生物炭在提高土壤肥力和减缓大气温室气体浓度升高领域的极大兴趣。将废弃生物质材料热裂解产生生物炭,还可获得生物油和混合气体等副产品^[6-7],可进一步升级加工成化学品和氢气^[8-9],增加废弃生物质资源的附

收稿日期:2012-01-16

基金项目:林业局“948”项目“林果木生物质综合转化技术引进”(2009-4-64);农业部“948”项目“生物炭技术引进及消化”(2010-Z19);陕西省攻关项目“高效生物炭基缓释肥配方及施用技术研究”(2010K02-12-1)

作者简介:高海英(1985—),女,硕士,主要从事废弃生物质资源化利用研究和市场农化服务工作。

E-mail:hygao0902@sina.com.cn.

* 通信作者:耿增超 E-mail:gengzengchao@sina.com.cn

加值,实现废弃生物质资源的有效管理和合理利用^[10]。为加强和推进生物炭技术研发和在农业及全球气候变化中的作用研究,国际科学家发起了“国际生物炭行动”计划(International Biochar Initiative),英国成立了生物黑炭研究中心(UK biochar research centre)^[11],中国对生物炭的研究则刚刚起步^[12-14]。研究表明,生物炭富含有机碳,且结构稳定^[15],施入土壤可提高土壤稳定性碳库,改善土壤质量,可作为农业应对气候变化的增汇途径^[16]。生物炭具有较强的离子吸附交换性能^[17],且本身具有一定的矿质养分^[18],施入土壤可改善土壤阴、阳离子交换量,提高土壤保肥性能,改善土壤养分状况,提高作物产量^[15,20-21]。但也有研究报道称,由于生物炭 60%以上为碳素^[21],矿质养分含量较低,施入土壤往往会提高土壤 C/N,降低土壤养分尤其是氮素养分的有效性^[22],单独施用生物炭在多数土壤上会导致当季或几季作物无增产效应,甚至减产^[23-24]。因此,将生物炭与肥料复合制备成生物炭基肥料成为生物炭农用的一个新的发展方向。Khan^[25]用木炭在 NPK 肥料溶液中通过吸附法制备生物炭基复合肥, NPK 养分均呈缓慢而恒稳释放,卢广远等^[16]采用粘合剂将炭粉与化学肥料复合制备成炭基肥料,对玉米具有较好的增产效应。由于氮肥是作物生产中用量最大、增产作用明显且环境风险较大的肥料^[26-29],本研究在实验室采用一定工艺小试制备两种生物炭基硝酸铵肥料,并采用盆栽试验研究生物炭基氮肥、生物炭材料对土壤 pH 值、CEC、土壤速效养分以及小麦、糜子作物产量的影响,以期为生物炭农用及炭基肥料在作物上合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 生物炭、生物炭基氮肥

供试材料共 4 种:竹炭材料(Bamboo charcoal,简称 BC)、木炭材料(Wood charcoal,简称 WC)、竹炭基氮肥(Bamboo charcoal-based nitrogenous fertilizer,简称 BAN)、木炭基氮肥(Wood charcoal-based nitrogenous fertilizer,简称 CAN)。其中 BAN、CAN 分别由通过 1 mm 筛孔的竹炭材料(BC)、木炭材料(WC)置于一定浓度硝酸铵水溶液中吸附平衡 24 h 后,60 °C 恒温鼓风干燥箱烘干用塑封袋保存备用。BC、WC 材料均系市场采购。供试材料部分理化性质如表 1。

1.1.2 土壤

供试土壤分别采自陕西省杨凌示范区二道塬塬

表 1 生物炭及炭基氮肥基本理化性质

Table 1 Elementary chemical and physical properties of biochars and biochar-based nitrogenous fertilizers in the pot trial experiment

样品	pH 值	CEC/cmol·kg ⁻¹	C/%	N/%	灰分/%
BC	9.18	5.81	62.61	0.75	19.71
WC	8.73	6.63	81.13	0.69	2.67
BAN	7.06		59.76	7.83	
CAN	6.78		40.64	17.59	

土(记作 S1)、陕西省杨凌示范区渭河河滩新积土(S2)。根据国际制土壤质地分级标准土壤 S1、S2 的质地分别为砂质壤土和壤质砂土,其基本性质如表 2。

表 2 供试土壤理化性质

Table 2 Elementary chemical and physical properties of soil used in the pot trial experiment

土壤	pH 值	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	颗粒组成/%		
						砂粒	粉粒	粘粒
S1	7.77	9.58	0.76	49.95	1 524.07	61.74	32.09	6.17
S2	8.46	4.17	0.56	4.99	64.74	86.45	11.02	2.53

1.1.3 作物

盆栽试验作物品种为西北农林科技大学选育的小麦(小偃-22 号)和宁夏固原市农业科学研究所选育的糜子(宁糜-14 号)。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验

室外盆栽培养试验,两种土壤分别各设 6 个处理,即:对照(施磷、钾肥,记作 CK)、对照硝酸铵肥料(施用氮、磷、钾肥,记作 AN)、竹炭材料(施用磷、钾肥及竹炭材料,记作 BC)、木炭材料(施用磷、钾肥及木炭材料,记作 WC)、竹炭基氮肥(施用磷、钾肥及竹炭基氮肥,记作 BAN)、木炭基氮肥(施用磷、钾肥及木炭基氮肥,记作 CAN)。每处理 4 次重复,每盆装土量 5 kg。氮、磷、钾肥分别为分析纯硝酸铵、磷酸二氢钙、硫酸钾,按 225 kg·hm⁻² 纯氮,180 kg·hm⁻² P₂O₅,150 kg·hm⁻² K₂O 的标准施用,竹炭、木炭、竹炭基氮肥、木炭基氮肥则均按等炭量施用。

盆栽试验进行了两季,第一季为小麦,第二季为糜子。小麦于 2010 年 10 月 17 日种植,2011 年 5 月 20 日收获;糜子各施肥处理同小麦,于 2011 年 6 月 15 日种植,2011 年 7 月 23 日收获。在小麦苗期和糜子生长前期各处理统一间苗,以保持各盆中植株数相等,作物生长期统一标准管理。作物收获后立即采

集土样,每盆布四点采用打土钻法采样。

1.2.2 分析方法

土壤 pH 值电位计测定,水:土为 2.5:1;土壤阳离子交换量(CEC)乙酸铵交换法;土壤有机碳重铬酸钾-外加加热法;土壤速效磷(Olsen P) $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-分光光度法;土壤速效钾 NH_4OAc 浸提,火焰光度法;土壤矿质态氮(硝态氮与铵态氮之和) $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 浸提-流动分析仪测定法;作物干物质重量法测定。

上述测定方法均参考鲍士旦主编的土壤农化分析^[30]。

1.3 数据处理

数据统计分析采用 Excel 2003 函数功能及 DPS7.05 软件统计分析作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭及炭基氮肥对土壤 pH、CEC 的影响

2.1.1 对土壤 pH 的影响

由表 3 看出,连续种植小麦和糜子两季作物后,施用生物炭及生物炭基氮肥处理的两种土壤 pH 值均高于对照土壤,说明施用生物炭及生物炭基氮肥可在一定程度上降低土壤酸度,提高土壤 pH。

在小麦季,对于土壤 S1,单施 BC、WC 的土壤 pH 显著高于 CK 和 BAN、CAN 处理的土壤 pH,与 AN 处理土壤 pH 差异不显著。硝酸铵为强酸弱碱盐,其水溶液为酸性,但本盆栽试验中施用硝酸铵(AN)处理的土壤 pH 却高于不施用硝酸铵处理(CK)的(小麦季土

壤 S2 和糜子季土壤 S1、S2 均有此现象),这可能和作物生长和施肥措施有关。施用 BAN 和 CAN 的土壤 pH 也显著高于对照土壤,但其增幅低于单施 BC 和 WC 的土壤,这说明生物炭与氮肥复合有缓和单施生物炭急剧提高土壤 pH 的问题。对于土壤 S2,单施 BC、WC 的土壤 pH 显著高于对照土壤、施 AN 土壤及施 BAN 和 CAN 的土壤,施用 BAN、CAN 的土壤 pH 也显著高于 CK 土壤,但与 AN 处理的土壤 pH 相当。

在糜子季,对于 S1 和 S2 两种土壤,单施生物炭均能在一定程度上降低土壤酸度,提高土壤 pH,施用生物炭基氮肥也可在一定程度上提高土壤 pH,但增幅低于单施生物炭的增幅。试验所用 BC、WC 的 pH 值分别为 9.18 和 8.73,有较强碱性,负载上硝酸铵化学肥料后,其 pH 值显著降低,分别降低至 7.0 和 6.78,接近中性,这也是生物炭基氮肥对土壤 pH 改变比单施生物炭要缓和的原因。

由表 3 还可看出,对于同一土壤下的同一处理,种植糜子后的土壤 pH 均小于种植小麦之后的土壤 pH,这可能是因种植作物不同所导致。我们知道土壤具有一定抵抗土壤溶液中 H^+ 、 OH^- 浓度改变的能力(即土壤缓冲性),由于土壤具有缓冲性,使得土壤酸碱度变化可稳定保持在一定范围内,不致因环境条件改变而产生剧烈变化。而本试验中,施用生物炭处理土壤 S1 和 S2 的 pH 与对照土壤相比变化较大,究其原因可能是本研究为盆栽试验,盆内装土量有限,使得土壤缓冲性能减弱。因此,生物炭及生物炭基氮肥对土壤酸碱性的调整是个长期过程,需要长期盆栽和大田试

表 3 不同施肥处理对土壤 pH 值和 CEC 的影响(小麦季+糜子季)

Table 3 Effects of experimental treatments on soil pH and soil CEC(wheat and pearl millet)

土壤	处理	小麦(小偃-22号)		糜子(宁糜-14号)	
		pH 值	阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值	阳离子交换量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
S1	CK	7.88±0.05d	5.19±0.19b	7.87±0.07d	5.26±0.13a
	AN	8.72±0.19a	5.40±0.18ab	8.56±0.10abc	5.45±0.08a
	BC	8.74±0.14a	5.33±0.19ab	8.63±0.06ab	5.40±0.18a
	WC	8.79±0.06a	5.26±0.20ab	8.64±0.07a	5.47±0.31a
	BAN	8.49±0.19b	5.52±0.19a	8.54±0.06bc	5.54±0.00a
	CAN	8.34±0.08c	5.54±0.20a	8.49±0.04c	5.56±0.30a
S2	CK	8.67±0.12c	2.06±0.03c	8.43±0.05b	2.24±0.05c
	AN	8.87±0.07b	2.16±0.03b	8.51±0.08ab	2.33±0.03ab
	BC	9.11±0.09a	2.09±0.04c	8.56±0.04a	2.28±0.03bc
	WC	9.05±0.09a	2.06±0.03c	8.50±0.04ab	2.27±0.05c
	BAN	8.89±0.16b	2.21±0.03a	8.45±0.07b	2.29±0.03abc
	CAN	8.81±0.12b	2.24±0.03a	8.46±0.08b	2.35±0.05a

注:同一土壤的同列数据后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

验数据支持。

2.1.2 对土壤 CEC 的影响

土壤 CEC 是衡量土壤肥力的重要指标,可直接反映土壤吸持和供给可交换养分的能力。

由表 3 可看出,在小麦季,对于土壤 S1,单施生物炭处理的土壤 CEC 高于对照土壤,但差异不显著,略低于 AN 处理的土壤 CEC,差异亦不显著,施用生物炭基氮肥处理的土壤 CEC 显著高于对照土壤,但与 AN 处理土壤 CEC 相当。对于土壤 S2,单施生物炭处理的土壤 CEC 同对照土壤 CEC 含量相当,却显著低于 AN 处理的土壤 CEC 含量,这与土壤 S2 本身肥力低,CEC 含量较低有关。而施用生物炭基氮肥处理的土壤 CEC 显著高于对照土壤、AN 处理土壤及单施生物炭处理的土壤 CEC。在糜子季,对于土壤 S1,施用生物炭基氮肥及生物炭处理的土壤 CEC 均在一定程度上提高了土壤 CEC 量,但差异不显著。对于土壤 S2,木炭基氮肥处理的土壤 CEC 显著高于对照土壤,但同竹炭基氮肥和 AN 处理差异不显著,单施生物炭处理的土壤 CEC 略高于对照土壤但差异不显著。

由表 3 还看出,对于同一土壤下的同一处理,糜子种植后的 CEC 量均高于小麦种植之后的土壤 CEC 量,但增幅不大,这主要因为生物炭对土壤 CEC 的改善作用与其和土壤相互作用的时间长短有关,随其在土壤中作用时间延长,生物炭经生物和非生物氧化会在生物炭芳香碳族结构的边缘产生羧基及羟基等离子交换官能团,从而导致土壤 CEC 增大^[31],进而改善土壤保水保肥能力。然而,本研究盆栽试验仅持续两季,生物炭与土壤作用时间有限,目前尚未观察到土壤 CEC 明显增大的趋势,这需要进一步长期试

验研究来观察。

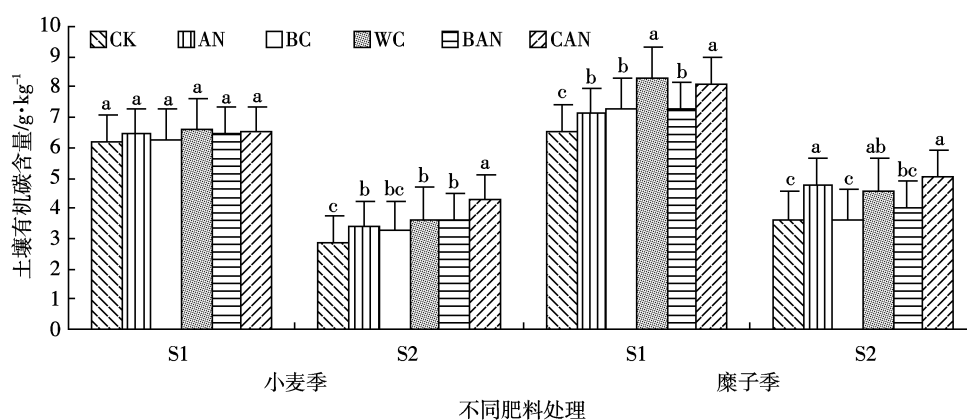
2.2 生物炭及炭基氮肥对土壤养分的影响

2.2.1 对土壤有机碳的影响

土壤有机质是评价土壤肥力高低的重要指标之一,是陆地生态系统中重要的碳汇,同时也是植物生长所需营养主要来源之一,可改善土壤团聚体结构、土壤通气性、透水性,促进土壤微生物活动等,从而提高土壤保肥性和缓冲性,促进植物生长发育。研究表明,生物炭为稳定芳香环结构的碳^[32],虽然其分子化学结构不同于有机质或腐殖质,但施入土壤同样可提高土壤有机碳含量^[33-34],起到改良培肥土壤的作用。

由图 1 看出,在小麦季,对于土壤 S1,各处理土壤有机碳含量为 CAN>BAN,WC>BC,各处理均高于 CK,但差异不显著。对于土壤 S2,单施 BC、WC 和 BAN、CAN 的土壤有机碳含量均显著高于 CK,且施 BAN 和 CAN 的土壤有机碳含量均显著高于相应 BC、WC 处理的有机碳含量。在糜子季,对于土壤 S1,单施 BC、WC 的土壤有机碳含量均高于相应施用 BAN、CAN 的土壤,且高于 AN 处理的土壤有机碳含量,但差异均不显著,施用 BC、WC 及 BAN、CAN 的土壤有机碳含量显著高于 CK。对于土壤 S2,施用 BAN 和 CAN 的土壤有机碳均高于相应单施 BC、WC 的土壤有机碳含量,但差异不显著。施用 WC 及 CAN 的土壤有机碳含量显著高于 CK,但同 AN 处理差异不显著,施用 BC 及 BAN 的土壤有机碳略高于 CK 但差异不显著,却显著低于 AN 处理。

由图 1 还看到,连续种植两季作物,同一土壤上糜子季各处理土壤有机碳含量均高于小麦季相应各



同一土壤的柱状图上不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同

图 1 生物炭及生物炭基氮肥处理的土壤有机碳含量

Figure 1 Soil organic carbon of soils received with biochars and biochar-based nitrogenous fertilizers

处理,且两季作物中各处理土壤有机碳含量均高于原始土壤有机碳含量(S1土壤有机碳含量为 $5.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、S2土壤有机碳含量为 $2.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这除了土壤处理中未能分离出去的极细小的植物残体所致外(S2土壤中的CK、AN处理),随着生物炭及生物炭基氮肥的逐季施入,土壤中累积的生物炭增多,附着于土壤表面上的极细小的生物炭颗粒可能是土壤中有机碳含量增大的又一原因。由于生物炭结构稳定,在土壤中很难被氧化,短暂的盆栽作物试验,尚不能确定有多少外引生物炭转化为土壤结构中的碳。但是,这种将生物炭引入土壤的行为,至少可将生物炭俘获固定的二氧化碳以稳定的生物炭形式封存于土壤中,有助于降低大气中的二氧化碳水平,这对减缓温室效应具有重要意义。

2.2.2 对土壤速效养分的影响

由表4可看到,施用生物炭和生物炭基氮肥可在一定程度上改善土壤速效养分状况。在小麦季,对于土壤S1,单施BC和WC的土壤同对照土壤和AN处理的土壤比较可显著提高土壤速效磷、速效钾含量,却略降低了土壤矿质态氮含量,说明单施BC、WC不能有效补充土壤氮素养分,也不能有效促进小麦对土壤磷、钾素的利用,反而有吸附保持土壤有效磷、钾的作用。由于补充了氮素,施用BAN和CAN的土壤同单施BC和WC的土壤相比,矿质态氮含量显著增大,速效磷含量显著降低,速效钾含量略有增大,但差异不显著。施用BAN和CAN的土壤同AN处理土壤相比,土壤矿质态氮含量显著增大,土壤速效磷略有降低但差异不显著,土壤速效钾含量显著提高,这均

说明在小麦种植季节中生物炭对土壤钾素有较强的吸附作用,而对磷的吸附作用较弱。对于土壤S2,单施BC和WC的土壤同施用BAN、CAN、AN土壤及CK土壤相比,土壤矿质态氮含量显著降低,土壤速效磷、钾含量显著增大。这说明氮素是砂土的制约性养分,单施BC、WC并不能有效补充氮素养分,也不能促进作物对土壤磷、钾素的利用,反而有吸附保持土壤有效磷、钾的作用。单施BC、WC后土壤有效磷、钾水平反而高于施用BAN和CAN的土壤,另一方面也说明施生物炭基氮肥有助于作物在砂土土壤上对土壤磷、钾素的吸收利用。

在糜子季,对于土壤S1,单施BC、WC的土壤同CK土壤和AN处理土壤相比,土壤矿质态氮含量显著降低,而土壤速效磷、钾含量显著增高,同样说明单施生物炭并不能有效补充土壤氮素养分,不能有效促进小麦对土壤磷、钾素的利用,反而有吸附保持土壤有效磷、钾的作用。施用BAN、CAN的土壤同单施BC、WC的土壤相比,土壤矿质态氮和速效钾含量均略有提高但差异不显著,而土壤速效磷含量显著降低,说明生物炭基氮肥可促进糜子磷素养分吸收,同时也说明补充氮素后土壤养分得到平衡更有利于糜子生长和养分元素的吸收利用。对于S2,单施BC、WC的土壤同AN处理土壤和BAN、CAN处理土壤相比,土壤矿质态氮含量降低,土壤速效磷、钾含量却显著增加,且单施生物炭后的土壤其土壤速效磷、钾含量显著高于施用生物炭基氮肥的土壤。这充分说明在糜子种植季,生物炭对土壤磷、钾具有较强的吸附作用。

表4 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤速效养分的影响(小麦季+糜子季)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Effect of biochars and biochar-based ammonium nitrate fertilizer on soil available nutrients (wheat and pearl millet)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

土壤	处理	小麦(小偃-22号)			糜子(宁糜-14号)		
		矿质态氮	速效磷	速效钾	矿质态氮	速效磷	速效钾
S1	CK	8.29±0.17c	52.84±1.64c	943.98±17.48c	6.12±0.77bc	21.12±4.67c	667.91±48.76d
	AN	14.24±0.29b	84.11±4.49b	973.55±34.59c	8.24±0.19a	34.51±7.46b	688.32±61.82d
	BC	7.52±0.80c	96.91±2.79a	1 035.17±93.65b	4.49±0.35d	47.89±8.91a	789.02±52.49c
	WC	10.48±0.88bc	95.27±8.48a	1 072.15±59.62ab	5.27±0.85cd	42.77±4.22a	863.86±38.58ab
	BAN	26.65±5.08a	80.60±9.39b	1 057.36±59.62ab	5.55±0.53bcd	36.20±6.22b	794.46±23.09bc
	CAN	28.19±5.92a	79.86±8.80b	1 101.72±49.16a	6.44±0.98b	36.32±1.50b	876.11±35.28a
S2	CK	9.97±0.96c	3.16±0.42d	35.13±4.04d	3.24±0.51c	5.63±1.08c	56.28±6.12c
	AN	13.91±2.58ab	19.18±2.27c	72.24±16.41c	7.13±1.21a	7.85±1.27c	59.25±8.14c
	BC	4.14±0.71d	31.80±3.85a	104.46±6.92a	4.11±0.46bc	27.13±10.45a	138.77±9.66a
	WC	5.27±2.17d	32.65±3.41a	106.41±5.91a	4.39±0.45bc	24.72±3.79a	128.26±5.28a
	BAN	12.64±2.16bc	23.52±2.57b	95.67±12.83ab	5.15±0.63b	16.96±4.70b	70.04±5.91b
	CAN	16.08±2.32a	22.11±2.16b	88.84±17.09b	5.10±1.57b	14.77±2.86b	74.35±4.94b

2.3 生物炭及炭基氮肥对小麦、糜子产量的影响

由图 2 可知,对于小麦季作物,在土壤 S1 各处理中,施用 WC 的小麦产量最高,较 CK 处理增产了 46.6%,较 AN 处理增产了 27.83%。施用 BAN、CAN 的小麦较 CK 处理分别增产了 22.16%和 10.70%,差异不显著。WC 处理中氮素为限制因素,而其小麦产量却高于氮、磷、钾养分更齐全的 BAN 和 CAN 处理的小麦产量,究其原因可能为木炭结构或木炭中某一或某些养分可促进小麦分蘖(分蘖前各处理小麦株数一致),进而促进小麦生长和产量增加。而 BC 处理的小麦较空白处理减产了 11.08%,较 AN 处理减产了 22.46%。在土壤 S2 各处理中,BAN 处理的小麦产量最高,较 CK 处理增产了 224.91%,差异极显著,较 AN 处理增产了 6.41%,差异不显著。AN、CAN 处理分别较空白增产了 205.34%和 127.67%,差异极显著。单施 BC、WC 也在一定程度上增加了小麦产量,较空白处理分别增加了 24.73%和 18.51%,但差异不显著。说明不同土壤上单施生物炭增产效应不稳定,而施用生物炭基氮肥的增产效应较显著。

糜子季作物,对于土壤 S1 各处理,AN 处理糜子产量最高,较空白处理增产了 197.70%,差异达极显著水平,其后依次为 BAN、CAN 处理,分别较 CK 土壤增产了 185.47%和 108.49%,差异极显著。单施 BC、WC 较 CK 处理增产了 44.90%和 4.03%,差异不显著,而较 AN 处理减少了 51.33%和 65.06%。在土壤 S2 各处理中,CAN 处理糜子产量最高,较 CK 增产了 514.69%,差异达极显著水平,较 AN 处理增加了 18.64%,差异不显著。BAN 处理次之,较 CK 土壤增产了 464.69%,差异显著,较 AN 处理增加了 8.99%,差异不显著。而单施 BC、WC 糜子产量较低,分别较 CK 处理减产了 28.75%和 20.94%,原因主要是试验所用的 BC、WC 含

矿质养分较低,对作物生长的直接养分作用有限,而且两者的含碳量很高,施入土壤可增大土壤 C/N,降低土壤养分有效性,尤其是土壤氮素有效性,从而影响作物对氮素吸收,进而影响作物产量。

小麦、糜子两季作物盆栽试验结果表明:在不同土壤或不同作物上施用生物炭基氮肥的生物肥效较好,增产效应显著,而单施生物炭,作物增产不显著甚至减产,这主要同生物炭矿质养分含量低、碳量高,降低土壤养分有效性,尤其氮素养分有效性有关。

3 讨论

本研究以两种不同质地土壤为供试土壤,以小麦(小偃-22)、糜子(宁糜-14)为供试作物,以硝酸铵试剂为对照肥料,研究了两种生物炭、两种生物炭基氮肥在这两种作物上的应用效果。结果表明,施用生物炭、生物炭基氮肥均可在一定程度上改善土壤部分性质和养分状况,但基于作物经济产量、土壤质量及环境等综合因素考虑,施用生物炭基氮肥的应用效果更好。

本试验所用竹炭、木炭、竹炭基氮肥、木炭基氮肥均可调节土壤 pH 值,但竹炭基氮肥和木炭基氮肥对土壤 pH 值调节更缓和,这是由于氮肥负载,降低了生物炭的碱性,使其 pH 值趋向中性,这使得生物炭基氮肥适应的土壤和作物更广泛。生物炭表面含有丰富的-COOH、-COH 和 -OH 等含氧官能团,这些含氧官能团所产生的表面负电荷使得生物炭具有较高的 CEC,因此施入生物炭可提高土壤 CEC。试验所用竹炭基氮肥、木炭基氮肥为吸附工艺制备,氮肥硝酸铵与竹炭、木炭间未发生化学变化,竹炭、木炭表面的化学官能团也并未发生改变,即负载氮肥后的竹炭、木炭并不会影响其对土壤 CEC 的改善。但生物炭对土壤 CEC 的改善还与生物炭在土壤中的老化时间或氧

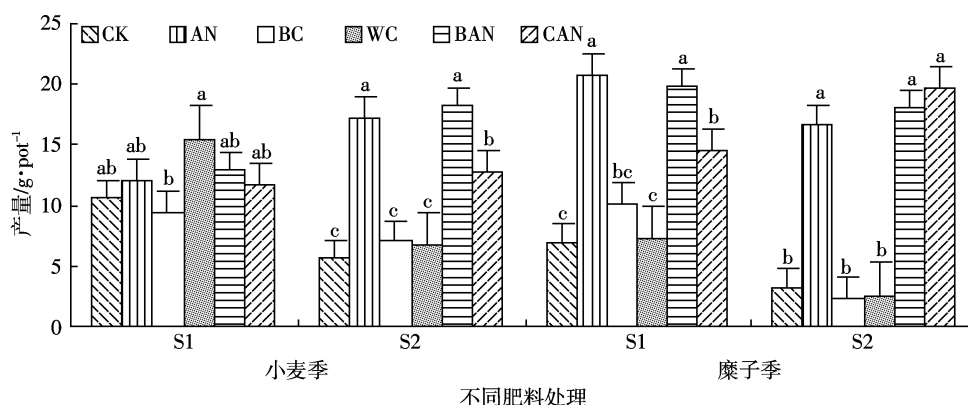


图 2 生物质炭及炭基硝酸铵肥料施用对小麦、糜子产量的影响

Figure 2 Effect of biochars and biochar-based ammonium nitrate fertilizer on yield of wheat and pearl millet

化程度有关,随其在土壤中作用时间延长,生物炭经生物和非生物氧化会在生物炭芳香碳族结构的边缘产生-COOH及-OH等离子交换官能团,从而导致土壤CEC增大^[37]。然而,本研究盆栽试验仅持续两季,生物炭与土壤作用时间有限,目前尚未观察到土壤CEC明显增大的趋势,这需要进一步长期试验研究。生物炭属高碳聚合物,施入可提高土壤有机碳含量,*Terra Preta*土壤充分表明生物炭是能稳定提高土壤有机碳水平的有机材料。试验所用的竹炭、木炭、竹炭基氮肥及木炭基氮肥,无论在肥力稍高的砂质壤土上还是肥力较低的壤质砂土上,均能在一定程度上提高土壤中有机碳含量,且随着生物炭及生物炭基氮肥逐季施入,两土壤各处理中有机碳含量逐渐增大。由于生物炭结构十分稳定,在土壤中很难被氧化,短暂的盆栽作物试验,尚不能确定有多少外引生物炭能转化为土壤结构中的碳,而各处理土壤中有机碳随逐季施入其含量逐渐增大主要是由夹杂或吸附于土壤颗粒上极细小的生物炭颗粒所致。但是,从环境角度看,这种将生物炭引入土壤的行为,至少可将生物质俘获固定的二氧化碳以稳定的生物炭形式封存于土壤中,有助于降低大气中二氧化碳水平,对减缓温室效应具有重要意义。生物炭的保肥性能主要来自于生物炭对各离子的吸附能力^[12]。本试验研究中施用竹炭、木炭、竹炭基氮肥、木炭基氮肥均在一定程度上提高了土壤速效磷、速效钾含量,说明生物炭对土壤中磷、钾具有一定的吸附作用。而单施生物炭在不同土壤或不同作物上矿质态氮含量均有不同程度地降低,这同生物炭高碳量,施入土壤增大土壤C/N,降低土壤氮素有效性有关。补充氮素后,即施用生物炭基氮肥的土壤矿质态氮含量无论是小麦季还是糜子季均较对照土壤有不同程度地提高。在本试验研究中,施用生物炭基氮肥在肥力不等的土壤或不同作物上生物肥效较好,增产效应明显,而单施生物炭,作物增产不显著甚至减产,这主要同生物炭矿质养分含量低、碳量高,降低土壤养分有效性,尤其氮素养分有效性有关。

基于生物炭对土壤化学性质、养分状况的改善,作物生长对养分的需求,将生物炭与化学肥料复合制备成生物炭基肥料,将是生物炭农用的新方向,也有利于生物炭农用效益的发挥。生物炭基肥料农用不仅解决了长期施用化肥对土壤结构、质量的破坏,且能充分利用废弃生物质资源,减少对生态环境的污染和破坏,更为重要的是作为二氧化碳俘获和碳封存剂的生物炭农用可将碳封存于土壤中,这对于减缓大气温

室气体浓度升高速度或降低大气温室气体浓度具有重大的意义。

4 结论

(1)竹炭、木炭与竹炭基氮肥、木炭基氮肥均可调节土壤pH值,使土壤pH值升高,生物炭基氮肥对土壤pH值改变更温和。

(2)竹炭、木炭与竹炭基氮肥、木炭基氮肥均能显著提高土壤有机碳含量,其中竹炭基氮肥、木炭基氮肥还能显著提高土壤CEC、速效磷、速效钾、矿质态氮含量,而施用竹炭、木炭却降低了土壤有效氮水平。

(3)施用竹炭基氮肥和木炭基氮肥在壤土和砂土上可显著促进小麦、糜子增产;而单独施用生物炭在不同土壤上其增产效应不稳定甚至减产。

致谢:感谢农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室和农业部西北植物营养与农业环境重点实验室在试验期间给予的帮助。

参考文献:

- [1] Lehmann J, Silva Jr J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of Central Amazonia: Fertilizer, and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 343-357.
- [2] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management science and technology[M]. UK and USA: Earthscan, 2009.
- [3] Whitman T, Lehmann J. Biochar—One way forward for soil carbon in offset mechanisms in Africa?[J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(7): 1024-1027.
- [4] Sombroek W. Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region[R]. Wageningen: Center for Agricultural Publications and Documentation, 1966.
- [5] Goldberg E D. Black carbon in the environment[M]. New York: Wiley, 1985.
- [6] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2009, 3(5): 547-562.
- [7] Brewer C E, Schmidt-Rohr K, Satrio J A, et al. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2009, 28(3): 386-396.
- [8] Wu Ceng, Yan Yong-jie, Li Ting-chen, et al. Preparation of hydrogen through catalytic steam reforming of bio-oil[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2007, 7(6): 1114-1119.
- [9] Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(5): 651-671.
- [10] Cantrell K, Ro K, Mahajan D, et al. Role of thermochemical conversion in livestock waste-to-energy treatments: Obstacles and opportunities [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2007, 46(26): 8918-8927.

- [11] International Symposium on Biochar Research, Development & Application. Nanjing, China, October on 10–15, 2011.
- [12] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153–157.
ZHANG Wen-ling, LI Gui-hua, GAO Wei-dong. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 153–157.
- [13] 刘玉学, 刘 微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977–982.
LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 977–982.
- [14] 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 biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 779–785.
- [15] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant Soil*, 2010, 327(1/2): 235–246.
- [16] 卢广远, 张 艳, 王祥福, 等. 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(5): 50–53.
LU Guang-yuan, ZHANG Yan, WANG Xiang-fu, et al. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(5): 50–53.
- [17] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [18] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of Biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105–112.
- [19] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a colombian savanna oxisol[J]. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2): 117–128.
- [20] Noguera D, Rondon, Laossi K R, et al. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils[J]. *Soil Biol Bio Chem*, 2010, 42(7): 1017–1027.
- [21] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 72: 243–248.
- [22] 宋延静, 龚 骏. 施用生物质炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 361–365.
SONG Yan-jing, GONG Jun. Effects of biochar application on soil ecosystem functions[J]. *Ludong University Journal(Natural Science Edition)*, 2010, 26(4): 361–365.
- [23] Asai H, Samson B K, Stephan H M, 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*, 2009, 111: 81–84.
- [24] Yan G Z, Kazuto S, Satoshi F, et al. The effects of bamboo charcoal and phosphorus fertilization on mixed planting with grasses and soil improving species under the nutrients poor condition[J]. *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, 2004, 30(1): 33–38.
- [25] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. *Environmentalist*, 2008, 28(3): 231–236.
- [26] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601–607.
JIN Ji-yun, LI Jia-kang, LI Shu-tian. Chemical fertilizer and food security[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 601–607.
- [27] 林 葆. 化肥与无公害农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 58–62.
LIN Bao. Chemical fertilizer and non-polluted agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003: 58–62.
- [28] 袁 洋. 肥料的科学生产与施用[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(1): 69–71.
YUAN Yang. Scientific production and application of fertilizer[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2010, 25(1): 69–71.
- [29] 江善襄. 磷酸、磷肥和复混肥料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991: 18–23.
JIANG Shan-rang. Phosphoric acid, phosphoric fertilizer and compound fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991: 18–23.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12, 30–34, 49–56, 81–83, 106–108, 169–172.
BAO Shi-dan. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 12, 30–34, 42–56, 81–83, 106–108, 169–172.
- [31] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37: 1477–1488.
- [32] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2000, 14: 777–794.
- [33] Kurosaki F, Koyanaka H, Hata T, et al. Macroporous carbon prepared by flash heating of sawdust[J]. *Carbon*, 2007, 45: 668–689.
- [34] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403–427.