

生物炭对塬土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响

曾 爱¹, 廖允成^{2*}, 张俊丽², 眭彦伟², 温晓霞²

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:生物炭作为土壤改良剂对酸性土壤改良研究有较多的报道,但是关于北方石灰性土壤研究报道很少,通过田间小区试验研究生物炭不同施用量对陕西关中塬土土壤含水量、有机碳和速效养分含量的影响。试验处理为:不施生物炭(CK)、生物炭施用量 1000 kg·hm⁻²(T1)、5000 kg·hm⁻²(T2)、10 000 kg·hm⁻²(T3)、20 000 kg·hm⁻²(T4),3次重复,随机区组排列,小麦生育期定期采样(分蘖期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期)。结果表明:小麦生育期内,不同处理土壤含水量随生物炭施用量提高呈先降低后升高趋势,T4最高,T2最低;土壤有机碳含量表现为 T4>T3>T2>T1>CK;土壤碱解氮和有效磷含量均随着生物炭施用量的增大呈先增加后降低趋势,处理 T1最高,T4和CK最低;土壤速效钾含量 T4>T3>T2>T1>CK。综合来看,在上述研究条件下,生物炭高施用量比低施用量有利于提高土壤含水量、土壤有机碳和速效钾含量,但在生物炭低施用量下土壤碱解氮和有效磷含量显著增高。

关键词:生物炭;塬土;土壤含水量;有机碳;速效养分

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)05-1009-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.019

Effects of Biochar on Soil Moisture, Organic Carbon and Available Nutrient Contents in Manural Loessial Soils

ZENG Ai¹, LIAO Yun-cheng^{2*}, ZHANG Jun-li², SUI Yan-wei², WEN Xiao-xia²

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract:It has been considerably reported about the applications of biochar as soil amendment to acidic soils, however, few literature has been reported about the applications of biochar to calcareous soils of northern China. Therefore, a field trail was conducted to study the effects of biochar on soil moisture, soil organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils of Guanzhong area, Shaanxi Province, PR China. The trail design was the randomly arranged blocks, with 5 treatments and 3 replications. The experimental treatments included 5 levels of biochar: no biochar(CK), 1000 kg·hm⁻²(T1), 5000 kg·hm⁻²(T2), 10 000 kg·hm⁻²(T3) and 20 000 kg·hm⁻²(T4), and soil samples were sampled at regular intervals during wheat crop growing period(tillering stage, reviving stage, jointing stage, heading stage and grain filling stage). The results indicated that the soil moisture contents of all the treatments showed an increasing trend after a decrease, with the rise of biochar application rates, and maximum soil moisture was recorded in T4, while minimum moisture was recorded in T2. The order of soil organic carbon contents of different treatments was recorded as T4>T3>T2>T1>CK. The contents of alkaline hydrolysis nitrogen and available phosphorus were highest in T1 while the minimum contents were recorded in T4 and CK, generally, these two parameters showed an initially increase but decreasing subsequently trend, with the increasing application rates of biochar. The soil readily available potassium contents in the different treatments followed a order as T4>T3>T2>T1>CK. It can be concluded that as compared with the low application rates of biochar, higher biochar application rates were conducive in enhancing the soil moisture, soil organic carbon and readily available potassium contents, however, low application rates of biochar markedly increased the alkaline hydrolysis nitrogen and available phosphorus contents of soil as compared with the higher rates of biochar.

Keywords:biochar; manural loessial soil; soil moisture; organic carbon; available nutrients

收稿日期:2012-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(31071375,31171506);西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目;高等学校学科创新引智计划资助(B12007)

作者简介:曾 爱(1986—),男,在读硕士,研究方向为农业生态。E-mail:332636277@qq.com

* 通信作者:廖允成 E-mail:yunchengliao@163.com

生物炭(Biochar)一般指生物质如木材、农作物废弃物、植物组织或动物骨骼等在完全或部分缺氧和相对温度“较低”(<700℃)条件下热裂解而形成的固态产物^[1]。生物炭通常含碳40%~75%,并含少量矿物质和挥发性有机化合物。生物炭质具有高度羧酸酯化和芳香化结构^[2],拥有较大的孔隙度和比表面积^[3],而且具有大量的表面负电荷以及高电荷密度的特性^[4-5]。生物炭的组成和结构决定其性质和功能,高度羧酸酯化和芳香化结构使其表现出高度的化学和微生物惰性^[6-7],热裂解制得的生物炭施于土壤后可产生20%的“碳负性”,可实现碳的减排^[8-10],同时可以提高土壤有机碳含量,利于土壤团聚体的形成^[11-12],利于形成较大的孔隙度和比表面积,降低土壤容重^[13-14];增加通气性和土壤持水量^[15-16],减小水分的渗透速度^[17]。除此之外,具有大量表面负电荷以及高电荷密度使生物炭能够增强土壤离子交换量^[18]和对土壤中养分的吸附^[4,19],减少养分淋溶,提高肥料养分利用率^[15,20],并且生物炭的孔隙结构可为菌根和细菌等微生物提供良好的生存和繁殖环境,促进土壤健康^[21-23]。前人研究表明,生物炭的施用效果与土壤类型密切相关^[17],陕西关中平原是我国重要的小麦产区,其土壤类型以壤土为主,本地区年均降雨量偏小,且土壤有机质含量较低,速效氮磷养分比较缺乏,施用生物炭能否改良本地区土壤,提高土壤水肥水平,还缺乏相关研究。基于此,本研究通过设置不同生物炭施用量,研究生物炭的施用对关中小麦田壤土土壤含水量、有机碳和速效养分含量的影响,为培肥地力、提高肥料的利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2011年10月中旬至2012年6月中旬在陕西省杨凌示范区标本区试验田(东经108°24',北纬34°20',海拔521 m)进行。该地区属暖温带半湿润易旱地区,年均日照时数2196 h,年均气温11~13℃,年均降雨量500~700 mm。试验区土壤属壤土(粘粒36.5%,粉粒61.1%,砂粒2.4%),耕层土壤(0~30 cm)有机质14.09 g·kg⁻¹,速效氮51.22 mg·kg⁻¹,速效磷7.61 mg·kg⁻¹,速效钾150.06 mg·kg⁻¹,pH7.58。

1.2 试验设计

选用的生物炭由河南三利新能源公司生产,生物炭的基本理化性质:有机碳467.0 g·kg⁻¹,全氮5.9 g·kg⁻¹,全磷0.61 g·kg⁻¹,全钾26 g·kg⁻¹,钙10 g·kg⁻¹,C/N为79.1,灰分含量20.8%,pH10.4。将生物炭撒匀于土

壤表面,用旋耕机翻混入耕层土壤。

试验设5个处理:对照不施生物炭(CK),处理生物炭施用量1000 kg·hm⁻²(T1),5000 kg·hm⁻²(T2),10 000 kg·hm⁻²(T3),20 000 kg·hm⁻²(T4)。采用随机区组设计,每处理3次重复,小区面积5 m×4 m=20 m²。试验供试小麦品种为陕麦139,播种量300 kg·hm⁻²,底肥尿素[ω(N)=46%]375 kg·hm⁻²和二胺[ω(P₂O₅)=46%]300 kg·hm⁻²。

1.3 试验方法

在小麦的分蘖期(11月23日)、返青期(2月15日)、拔节期(3月18日)、抽穗期(4月12日)、灌浆期(5月17日)在各小区耕层土壤(0~30 cm)每10 cm土层用土钻取一次土,将各小区所取土样混匀,取部分土样装入铝盒测定各处理土壤含水量,余下的土样风干过筛后测定各处理土壤有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾含量和pH值。土壤含水量的测定采用烘干称重法,土壤有机碳的测定采用外加热法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用钼锑抗比色法,速效钾采用火焰光度法,pH值采用电位法(土水比1:2.5)^[24]。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 绘制图表,SPSS 16.0 软件对数据进行单因素方差分析(Duncan 多重比较)和相关分析,显著性水平设为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭施用量对土壤含水量的影响

由图1可知,在分蘖期处理CK、T1、T2、T3、T4间土壤含水量均无显著性差异。在返青期土壤含水量处理T4、T3比T2分别增加6.4%、4.1%,T4比T1增加5.2%,差异达到显著性水平。在拔节期土壤含水量处理T4比CK增加6.2%,比T1、T2、T3分别增加6.8%、8.9%、4.9%,差异达到显著性水平。在抽穗期土壤含水量处理T2比CK降低7.4%,比T1、T4依次降低6.6%、7.4%,差异达到显著性水平。在灌浆期土壤含水量处理T1、T2依次比CK降低9.3%、10%,差异达到显著性水平。

通过相关分析可知,在小麦返青期、拔节期土壤含水量与生物炭施用量相关系数($n=15$)分别为0.643、0.692,都达到显著水平($P<0.05$);而在分蘖期、抽穗期、灌浆期未表现出显著相关性。

2.2 不同生物炭施用量对土壤有机碳含量的影响

由图2可知,在分蘖期土壤有机碳含量处理T1、T2、T3、T4比CK依次增加18.7%、11.4%、45.9%、

76.1%,土壤有机碳含量为 $T4>T3>T1>T2$, 差异达到显著性水平。在返青期土壤有机碳含量处理 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 比 CK 依次增加 13.0%、5.46%、62.2%、69.0%, 土壤有机碳含量 $T4>T3>T1>T2$, 差异达到显著性水平。在拔节期土壤有机碳含量处理 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 比 CK 依次增加 18.9%、21.0%、47.9%、63.9%, 土壤有机碳含量 $T4>T3>T2$, 差异达到显著性水平。在抽穗期土壤有机碳含量处理 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 比 CK 依次增加 16.3%、28.9%、41.7%、45.9%, 土壤有机碳含量 $T4>T3>T2>T1$, 差异达到显著性水平。在灌浆期土壤有机

碳含量处理 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 比 CK 依次增加 16.0%、21.5%、35.5%、56.2%, 土壤有机碳含量 $T4>T3>T2>T1$, 差异达到显著性水平。

通过相关分析可知,在小麦分蘖期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期,土壤有机碳含量与生物炭施用量相关系数($n=15$)依次为 0.960、0.895、0.950、0.875、0.970,均达到显著水平($P<0.05$);土壤有机碳含量随着生物炭施用量的增加而显著增加。

2.3 不同生物炭施用量对土壤碱解氮含量的影响

由图 3 可知,在分蘖期土壤碱解氮含量处理 $T1$ 、

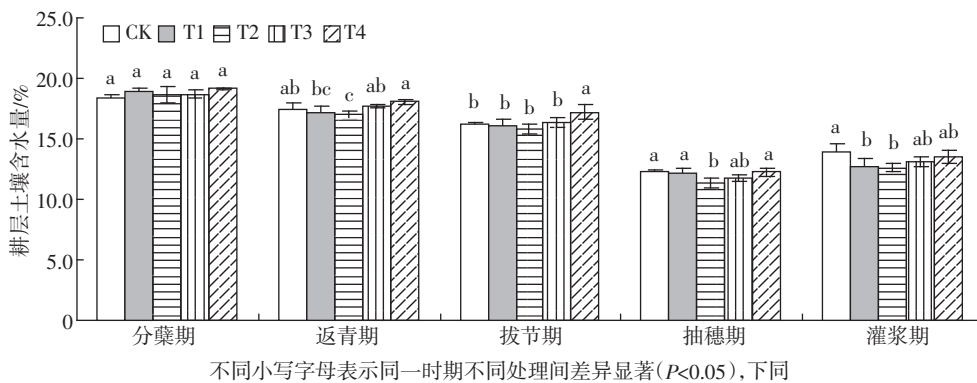


图 1 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)含水量

Figure 1 Soil(0~30 cm) moisture content of different treatments in wheat growing season

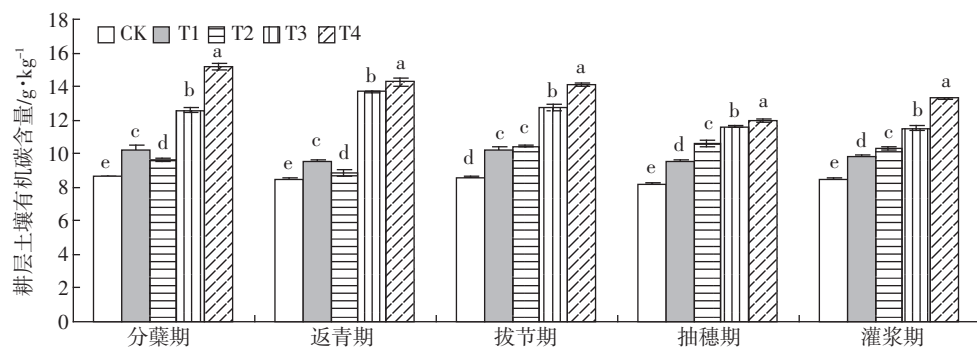


图 2 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)有机碳含量

Figure 2 Soil(0~30 cm) organic carbon content of different treatments in wheat growing season

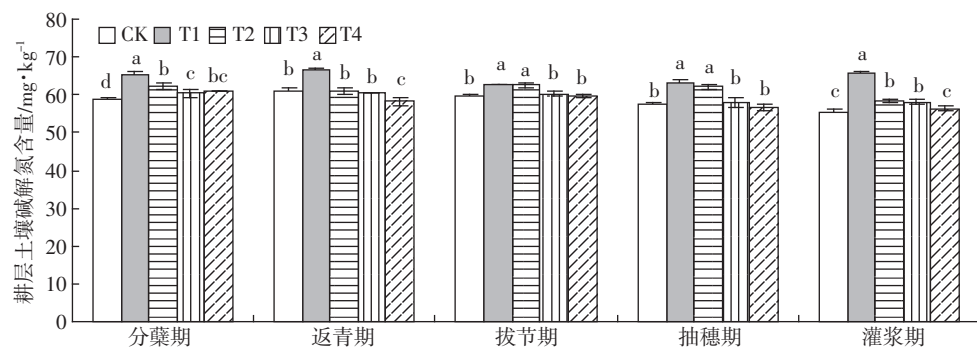


图 3 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)碱解氮含量

Figure 3 Soil(0~30 cm) alkaline hydrolysis nitrogen content of different treatments in wheat growing season

T2、T3、T4 比 CK 依次增加 11.2%、5.6%、2.6%、3.7%，T1 比 T2、T3、T4 分别增加 5.3%、8.4%、7.2%，差异达到显著性水平。返青期土壤碱解氮含量处理 T1 比 CK 增加 8.9%，T4 比 CK 降低 4.7%，T1 比 T2、T3 分别增加 9.0%、9.9%，T4 比 T1、T2、T3 依次降低 12.4%、4.5%、3.8%，差异达到显著性水平。拔节期土壤碱解氮含量处理 T1、T2 比 CK 分别增加 5.1%、4.8%，T1 比 T3、T4 分别增加 3.9%、5.1%，差异达到显著性水平。抽穗期土壤碱解氮含量处理 T1、T2 比 CK 分别增加 10.2%、8.3%，T1 比 T3、T4 分别增加 9.2%、11.3%，差异达到显著性水平。灌浆期土壤碱解氮含量处理 T1、T2、T3 分别比 CK 增加 17.9%、5.1%、4.6%，T1 比 T2、T3、T4 分别增加 12.2%、12.8%、16.3%，T4 比 T2、T3 分别降低 3.5%、3.0%，差异达到显著性水平。

在小麦返青期、抽穗期土壤碱解氮含量与生物炭施用量相关系数($n=15$)分别为-0.698、-0.523，均达到显著水平($P<0.05$)；而在分蘖期、拔节期、灌浆期未表现出这种显著相关性。

2.4 不同生物炭施用量对土壤有效磷含量的影响

由图 4 可知，分蘖期土壤有效磷含量处理 T1、T2 比 CK 依次增加 27.1%、11.5%，T4 比 CK 降低

20.9%，T1 比 T2、T3、T4 分别增加 13.9%、25.5%、60.8%，差异达到显著性水平。返青期土壤有效磷含量处理 T1 比 CK 增加 41.6%，T2、T3、T4 比 CK 分别降低 7.4%、38.5%、54.9%，T1 比 T2、T3、T4 分别增加 52.8%、130.1%、214.0%，差异达到显著性水平。拔节期土壤有效磷含量处理 T1、T2、T3 比 CK 依次增加 85.7%、78.3%、40.6%，其中 T1 比 T3 增加 32.1%，T4 比 T1、T2 分别降低 36.6%、34.0%，差异达到显著性水平。抽穗期土壤有效磷含量处理 T1、T2、T3 比 CK 依次增加 237.0%、102.2%、60.2%，其中 T1 分别比 T2、T3、T4 增加 66.7%、110.4%、192.8%，差异达到显著性水平。灌浆期土壤有效磷含量处理 T1 比 CK 增加 38.9%，T4 比 CK 降低 35.1%，T1 比 T4 增加 114.1%，差异达到显著性水平。

在小麦分蘖期、返青期、抽穗期土壤有效磷含量与生物炭施用量相关系数($n=15$)分别为-0.630、-0.851、-0.591，都呈现显著性($P<0.05$)；而在拔节期、灌浆期未表现出这种显著相关性。

2.5 不同生物炭施用量对土壤速效钾含量的影响

由图 5 可见，在分蘖期土壤速效钾含量处理 T1、T2、T3、T4 比 CK 依次增加 8.9%、10.8%、36.5%、

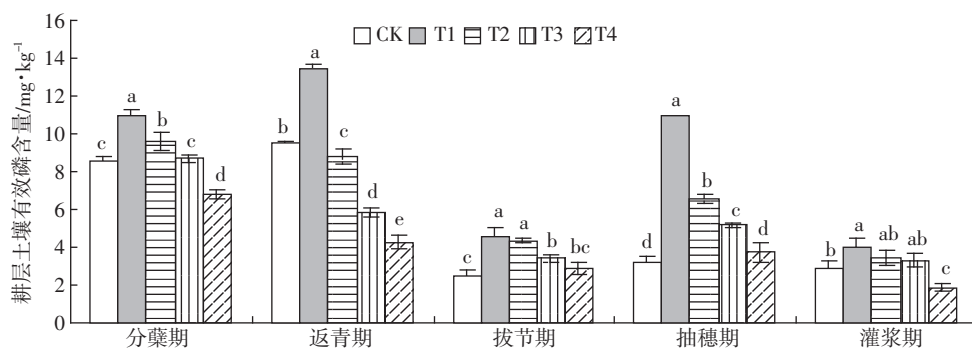


图 4 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)有效磷含量

Figure 4 Soil(0~30 cm) available phosphorus content of different treatments in wheat growing season

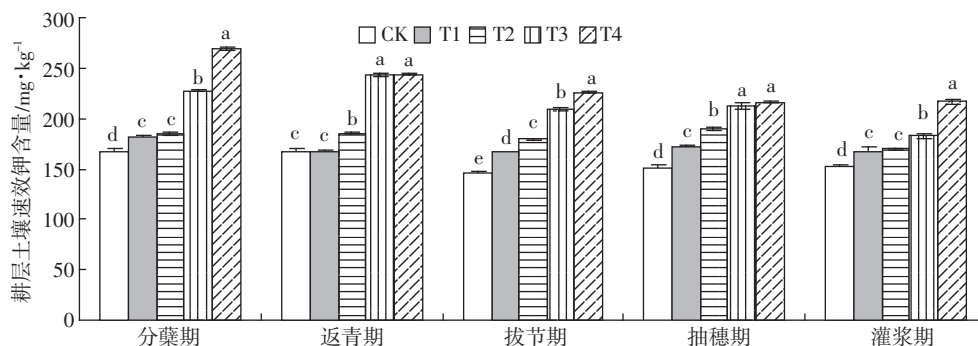


图 5 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)速效钾含量

Figure 5 Soil(0~30 cm) readily available potassium content of different treatments in wheat growing season

61.7%,土壤速效钾含量 $T4>T3>T2$,差异达到显著性水平。在返青期土壤速效钾含量处理 $T2、T3、T4$ 比 CK 依次增加 11.4%、45.5%、46.1%,土壤速效钾含量 $T4>T2>T1$,且差异达到显著性水平。在拔节期土壤速效钾含量处理 $T1、T2、T3、T4$ 比 CK 依次增加 13.7%、23.3%、43.8%、54.8%,土壤速效钾含量 $T4>T3>T2>T1$,差异达到显著性水平。在抽穗期土壤速效钾含量处理 $T1、T2、T3、T4$ 比 CK 依次增加 13.9%、25.2%、41.1%、43.0%,土壤速效钾含量 $T4>T2>T1$,差异达到显著性水平。在灌浆期土壤速效钾含量处理 $T1、T2、T3、T4$ 与 CK 相比依次增加 9.9%、11.8%、20.4%、42.8%,土壤速效钾含量 $T4>T3>T2$,差异达到显著性水平。

在小麦分蘖期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期,土壤速效钾含量与生物炭施用量的相关系数 ($n=15$) 分别为 0.984、0.900、0.946、0.880、0.976,且都表现出显著性 ($P<0.05$);土壤速效钾含量随着生物炭施用量的增加而显著增加。

3 讨论

3.1 不同生物炭施用量对土壤含水量的影响

土壤保水能力受土壤质地、结构和土壤有机质含量的影响。生物炭施入土壤后改变土壤孔隙度和团聚程度,最终影响到土壤的保水能力,影响程度取决于土壤比表面积的相对变化^[17,19]。在小麦生育期,不同处理土壤含水量与生物炭施用量的相关性不明显,土壤含水量变化趋势为处理 $T4$ 最高, $T2$ 最低, $T1、T3$ 和 CK 居于中间,这与高海英等^[25]研究结果不完全一致。造成这种现象的原因可能是生物炭高施用量(如 $T4$)增加了土壤的孔隙度和土壤团聚体的形成,显著增大了土壤比表面积^[11-13],土壤保水能力提高;在生物炭低施用量(如 $T1、T2$)条件下,新鲜生物炭中的活性碳源能够引起(激发)土壤中有机物质的分解^[26],土壤原有的结构被破坏,比表面积下降(因低量生物炭通过增加土壤的孔隙度和土壤团聚体形成而增大的土壤比表面积不足以抵偿土壤结构破坏引起的土壤比表面积的下降),土壤保水能力降低。

3.2 不同生物炭施用量对土壤有机碳和速效钾含量的影响

生物炭通常含碳 40%~75%,具有高度羧酸酯化和芳香化结构,表现出高度的化学和微生物稳定性,施入土壤能够提高土壤的有机碳含量^[27-28],土壤有机碳含量的提高幅度取决于生物炭的施用量。由前文分

析可知,本试验中土壤有机碳含量随着生物炭施用量增多而显著增加,造成这种现象的原因可能是本试验所用生物炭中有机碳含量为 46.7%,混入土壤后提高了土壤总有机碳含量,且提高的幅度与施用量呈正相关。

生物炭中钾的有效性较高,施入土壤能提高土壤速效钾和作物的吸收量^[15,29]。此外生物炭施入土壤能增强土壤离子交换量,有效减少土壤中钾的淋溶损失^[29]。本试验用生物炭钾含量为 $26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,生物炭施入土壤后可能是通过直接提供速效钾和间接减少土壤中钾的淋溶,显著提高了土壤中速效钾的含量,与 Tryon 等^[30]的研究结果一致。

3.3 不同生物炭施用量对土壤碱解氮和有效磷含量的影响

土壤 pH 值影响土壤微生物活动,还与土壤有机物质的分解,氮、磷元素的转化和释放密切相关^[31],可见土壤 pH 值与土壤养分碱解氮、有效磷之间存在较大的关联。本试验中不同处理土壤 pH 值并未表现出明显差异(以返青期、拔节期、灌浆期为例),与 Chan 等^[15]的研究结果不一致(表 1)。其原因可能是本试验供试土壤呈中性,且具有一定的酸碱缓冲能力,此外试验处理施入的生物炭量不高,以致处理间土壤 pH 值的差异不显著。因此,可忽略生物炭通过改变土壤 pH 值对土壤碱解氮和有效磷产生的影响。

表 1 小麦生育期不同处理土壤(0~30 cm)pH 值

Table 1 Soil(0~30 cm) pH of different treatments in wheat growing season

处理	分蘖期	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期
CK	7.66±0.08ab	7.72±0.04a	7.60±0.05a	7.63±0.02a	7.57±0.03a
T1	7.76±0.05a	7.74±0.05a	7.53±0.05a	7.67±0.02a	7.52±0.03a
T2	7.75±0.08a	7.75±0.09a	7.57±0.01a	7.62±0.05a	7.55±0.01a
T3	7.66±0.06ab	7.72±0.06a	7.56±0.07a	7.52±0.10b	7.53±0.04a
T4	7.61±0.05b	7.69±0.10a	7.51±0.07a	7.47±0.01b	7.53±0.03a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

生物质中的氮在裂解过程中发生结合态的转变,氮的有效性降低^[32]。Chan 等^[33]以畜禽粪便为原料的生物炭中氮总量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中矿质态氮的含量不足 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Bridle 等^[34]以污水污泥为原料的生物炭中氮总量高达 $64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中矿质态氮含量却可忽略,生物炭施入土壤对土壤碱解氮含量的直接增多作用可能很小。本试验中土壤碱解氮含量与生物炭施用量关系表现为处理 $T1$ 最高, $T2、T3$ 逐渐降低, $T4$ 和 CK

最低,与周桂玉等^[35]的研究结果不一致。造成这种现象的原因可能是在生物炭低施用量的条件下,生物炭的效应以吸附土壤溶液中的铵态氮和硝态氮,减少土壤氮的淋溶损失^[29],和促进土壤中有机态氮的矿化,释放出铵态氮和硝态氮为主^[17],表现出增加土壤碱解氮含量;而生物炭高施用量条件下,导致土壤 C/N 过高,引起土壤碱解氮的生物固定^[17,26],拮抗生物炭对土壤碱解氮的增加作用,致使高生物炭施用量处理土壤碱解氮含量较低施用量处理降低。

生物炭中磷的有效性也较低,Tsai 等^[36]分别以水稻秸秆和椰子壳为原料制成的生物炭中有效磷的含量都甚微,生物炭施入土壤对土壤有效磷含量的直接贡献可能很小。本试验中土壤有效磷含量与生物炭施用量表现为处理 T1 最高,T2、T3 逐渐降低,CK 和 T4 最低,与周桂玉^[35]、Tryon^[30]等的研究结果并不一致。造成这种现象的原因可能是在低量的生物炭施用条件下,生物炭的效应以吸附土壤溶液中的磷酸根,减少土壤有效磷的淋溶^[37]及与土壤中的 Al、Fe 氧化物胶体竞争对有效磷的闭蓄态固定,减少固定损失^[38]和促进土壤有机态磷的矿化为主^[17],综合表现出增加土壤有效磷含量;高施用量下可能同时造成土壤 C/N 过高(本研究用生物炭含钙 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),引起土壤中有效磷的生物固定和加剧 Ca-促磷酸根沉降反应(化学固定)^[39],综合表现为土壤有效磷含量显著降低。

本研究所用生物炭为新鲜生物炭,其中含有的活性碳源对土壤中原有的有机物质可能产生影响,如影响土壤团聚程度、土壤养分的微生物转化,从而对研究结果产生较大影响。研究生物炭施用量对壤土的土壤含水量、有机碳和速效养分含量的影响还需进行长期的田间定位试验。

4 结论

本研究条件下,小麦生育期内,土壤含水量随生物炭施用量的增加先降低后增加;土壤有机碳和速效钾的含量随着生物炭施用量的增多而显著增加;土壤碱解氮和有效磷的含量随着生物炭施用量的增多表现为先显著增加后降低。

参考文献:

[1] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 395–419.
[2] Washington J B, Joseph J P, Yuefeng L, et al. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(2): 409–

417.
[3] Gerard C, Zofia K, Stavros K, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(13): 3632–3640.
[4] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1719–1730.
[5] Fuertes A B, Camps A M, Sevilla M, et al. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonization of corn stover[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 618–626.
[6] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 327–337.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing, et al. Core issues and re-search progresses of soil science of C sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327–337.
[7] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 577–585.
[8] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447: 143–144.
[9] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon(charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 190–206.
[10] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010: 1–56.
[11] Bruun S, El-Zahery T, Jensen L. Carbon sequestration with biochar—stability and effect on decomposition of soil organic matter[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2009, 6(24): 242010.
[12] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6): 2061–2069.
[13] Busschei W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influences of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. *Soil Science*, 2010, 175(1): 10–14.
[14] Teixeira W G, Martins G C. Soil physical characterization[M]//Lehmann J, Kern D C, Glaser B, et al. eds. *Amazonian dark earths origin properties management*. Dordrecht, Kluwer Academic, 2003: 271–286.
[15] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 629–634.
[16] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2009, 111: 81–84.
[17] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management science and technology*[M]. London: Earthscan, Ltd, London, UK, 2009.
[18] 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.
[19] 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.
- [20] 钟雪梅,朱义年,刘杰,等.竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊):154–157.
- ZHONG Xue-mei, ZHU Yi-nian, LIU Jie, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):154–157.
- [21] Saito M. Charcoal as micro-habitat for VA mycorrhizal fungi, and its practical application[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1990, 29:341–344.
- [22] Steiner C, Das K C, Garcia M, et al. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferral soil[J]. *Pedobiologia*, 2008, 51:359–366.
- [23] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bio-energy[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31:426–432.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [25] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24):207–213.
- GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24):207–213.
- [26] Deenik J L, McClellan A T, Uehara G. Biochar volatile matter content effects on plant growth and nitrogen transformations in a tropical soil[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2010, 74:1259–1270.
- [27] Zwieten L V, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327:235–246.
- [28] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14:777–794.
- [29] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertiliser, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soils*, 2003, 249:343–357.
- [30] Tryon E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. *Ecological Monographs*, 1948, 18:81–115.
- [31] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [32] Bagreev A, Bandosz T J, Locke D C. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage-derived fertilizer[J]. *Carbon*, 2001, 39:1971–1979.
- [33] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Assessing the agronomic values of contrasting char materials on Australian hardsetting soil[C]. Proceedings Conference of the International Agrichar Initiative, 30 April–2 May 2007, Terrigal, NSW, Australia.
- [34] Bridle T R, Pritchard D. Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis[J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50:169–175.
- [35] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10):2075–2080.
- ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):2075–2080.
- [36] Tsai W T, Lee M K, Chang Y M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 76:230–237.
- [37] Lehmann J, Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics[M]//Uphoff N, Ball A S, Fernandes E, et al. eds. Biological approaches to sustainable soil systems. Boca Raton, CRC Press, 2006:517–530.
- [38] Sibanda H M, Young S D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37:197–204.
- [39] 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.