

施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响

唐光木¹, 葛春辉¹, 徐万里^{1*}, 王西和¹, 郑金伟², 李恋卿², 潘根兴²

(1.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091; 2.南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要:通过田间小区对比试验,研究生物黑炭作为改良剂与堆肥等其他生物质改良剂相比对新疆低产土壤——灰漠土的改良和玉米增产的效果。结果表明,施入 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物黑炭,能显著提高土壤有机质含量,与基础土壤相比,提高了 22.77% 和 49.80%,明显高于秸秆还田、羊粪和腐植酸有机肥等对土壤有机质的提升效果。施用生物黑炭提高了玉米单穗重、千粒重、产量以及生物量,降低了玉米的根冠比,促进玉米根系生长,而追施氮肥对玉米产量的影响差异不显著。因此,施用生物黑炭能够大幅度提高土壤有机质含量,对灰漠土土壤质量和作物产量以及农艺性状的提高具有重要作用。

关键词:生物黑炭;灰漠土;有机质;玉米产量;根冠比

中图分类号:S156.93 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1797-06

Effect of Applying Biochar on the Quality of Grey Desert Soil and Maize Cropping in Xinjiang, China

TANG Guang-mu¹, GE Chun-hui¹, XU Wan-li^{1*}, WANG Xi-he¹, ZHENG Jin-wei², LI Lian-qing², PAN Gen-xing²

(1.Institute of Soil and Fertilizer & Agricultural Sparing Water, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China; 2.Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Biochar carbonized from straws or other agriculture wastes applied in soil as a important way to decrease greenhouse gas emission and enhance carbon sequestered was frequently studied by lots of scientists recently. So this text to study on the effect of the biochar to modify grey desert soil and the maize yield by comparison with the other biomass amendment through the plot trials. The results showed that: soil organic matter with biochar of $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ applied was increased by 22.77% and 49.80% respectively compared with control plot, and organic matter content in soil of biochar applied was significantly higher than that of farm manure, straw returning, humic acid fertilizer amended. Meanwhile, biochar amended could increase single spike weight, thousand kernel weight, yields and biomass, and decrease maize root-shoot ratio and improve root growth, but no obvious difference with different dosage N fertilizer utilized. So, biochar application could not only improve maize physiological characters and increase yield, but also promote soil organic matter content and decrease content of N fertilizer applied in Xinjiang. Biochar from straw or other agriculture waste carbonized applied in soil would be considered as an effective way to promote soil fertility and productivity.

Keywords: biochar; grey desert soil; organic matter; maize yield; root-shoot ratio

最近 5 年多来,农业废弃物生物黑炭转化和农业应用作为一种农业增汇减排和提高土壤生产力技术途径得到国际科学界的广泛重视,其技术开发和田间试验研究日益活跃^[1-5]。生物黑炭是由生物质体热裂解

转化形成的复杂有机质混合物,在土壤中稳定性较高,具有以改善土壤物理性质、提高水土保持能力和增加有机碳库的良好作用^[6]。我国耕地质量总体欠佳,现有耕地中中低产耕地大约占 75%,有机质含量低是普遍问题。全国农田土壤有机质含量<1.5%的面积占耕地面积的 65%^[6-7],而我国具有丰富的生物质资源。农业每年产生各类农作物秸秆总量在 7 亿 t 左右^[8],其中水稻、小麦、玉米等大宗农作物秸秆在 5 亿 t 左右,另外还有各种废弃物,应用各种生物质资源转化为生物黑炭可以减少废弃物排放,促进循环农业的发展。

收稿日期:2011-03-19

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903003);
南京农业大学农业与气候变化研究中心开放基金;国家“十一
五”科技支撑计划(2009BADA4B03)

作者简介:唐光木(1983—),男,河南鄆县人,助理研究员。

E-mail: tangjunhui5120@126.com

*** 通讯作者:**徐万里 E-mail: wlxu2005@163.com

而转化的生物黑炭可以作为土壤改良剂施用于土壤,提高土壤有机质碳库,这不但对于陆地固碳,而且对于耕地土壤培肥、提高农业生产力均具有重要意义^[9]。

灰漠土是新疆主要的低产土壤之一,改良其“白、板、干”的障碍特性是提高灰漠土土壤肥力和肥料效率的关键。本文通过 2010 年在新疆灰漠土国家土壤肥力监测基地的玉米田间试验,研究生物黑炭作为改良剂对灰漠土土壤质量和玉米作物产量的影响,并通过与堆肥等其他生物物质改良剂对比,阐明生物黑炭改良灰漠土和玉米增产效果,为进一步探索新疆低有机质含量的旱地土壤快速培肥途径提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年 5 月在新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所所属的国家灰漠土肥力与肥料效益监测站进行,供试作物为玉米,采用常规玉米品种,土壤类型为灰漠土。

试验共设 9 个处理(表 1),每个处理 3 次重复,共 27 小区,小区面积 20 m²(4 m×5 m),采用随机区组排列。小区间有宽 1 m 的保护行。肥料均在玉米移栽前混施于土壤,并耙平混匀。玉米移栽密度 9 万株·hm⁻²,管理同常规,处理间一致。其中,玉米秸秆含有机碳 400 g·kg⁻¹,全氮 8.69 g·kg⁻¹,全磷 1.33 g·kg⁻¹,全钾 11.12 g·kg⁻¹;羊粪含有机碳 400 g·kg⁻¹,全氮含量 7.25 g·kg⁻¹,全磷 5.12 g·kg⁻¹,全钾 4.32 g·kg⁻¹;腐植酸有机肥含有机碳 600 g·kg⁻¹,全氮 8.76 g·kg⁻¹,全磷 1.38 g·kg⁻¹,全钾 9.50 g·kg⁻¹;施用的生物黑炭为河南三利新能源公司出品,其基本性质和养分含量见文

献[10]。

1.2 样品采集与测定

在试验未划出小区前,按 S 形选择 15 点,采集表土土壤样品,混合均匀后作为试验前土壤基本性质测定。试验处理后在玉米生长的苗期和收获期,分别在各小区按 S 形采集 5 个点,混合均匀作为一个混合土样。采集的土壤样品,进行自然风干后,按照常规方法^[11]进行土壤有机质、全氮和碱解氮的测定。

玉米成熟后各小区单打单收,现场进行玉米地上部、地下部、根长等生理指标和产量的测定。

1.3 数据分析

数据采用 SPSS13.0 和 Excel 2003 进行统计分析,并采用最小显著差数法(LSD)方法进行不同处理间差异显著性检验分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物黑炭改良剂对灰漠土土壤养分的影响

2.1.1 土壤有机质含量

从图 1 可以看出,各处理玉米生长收获期土壤有机质含量比苗期低 0.22~5.53 g·kg⁻¹,降低幅度为 1.59%~21.62%;同时,N0PK 和施氮处理 NPK 土壤有机质含量无论是苗期还是成熟期均低于试验前:苗期分别减少了 2.88 g·kg⁻¹ 和 2.44 g·kg⁻¹,降低了 17.31% 和 14.67%,收获期分别减少了 3.10 g·kg⁻¹ 和 4.07 g·kg⁻¹,降低了 18.62% 和 24.48%。无论是苗期还是收获期,施土壤改良剂各处理土壤有机质含量均显著高于试验前,苗期高出 1.96~13.43 g·kg⁻¹ 之间,提高幅度为 14.28%~80.79%,收获期高出 1.41~8.28 g·kg⁻¹ 之间,提高幅度介于 11.25%~49.80%。

从图 1 还可以看出,施用生物黑炭对土壤有机质

表 1 试验处理设计及施肥量

Table 1 The design of treatment and quantity of fertilization

处理代号	处理编码	N/kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	KCl/kg·hm ⁻²	有机肥/t·hm ⁻²
1	N0PK	0	300	75	—
2	NPK	300	300	75	—
3	NPKS	300	300	75	秸秆
4	NPKM	300	300	75	羊粪 30
5	NPKH	300	300	75	腐植酸 20
6	PKT1	—	300	75	生物黑炭 20
7	NPKT1	300	300	75	生物黑炭 20
8	PKT2	—	300	75	生物黑炭 40
9	NPKT2	300	300	75	生物黑炭 40

注:施入羊粪和腐植酸量与施入 20 t·hm⁻² 生物黑炭所含有机碳总量相等,玉米秸秆施行全部秸秆还田。

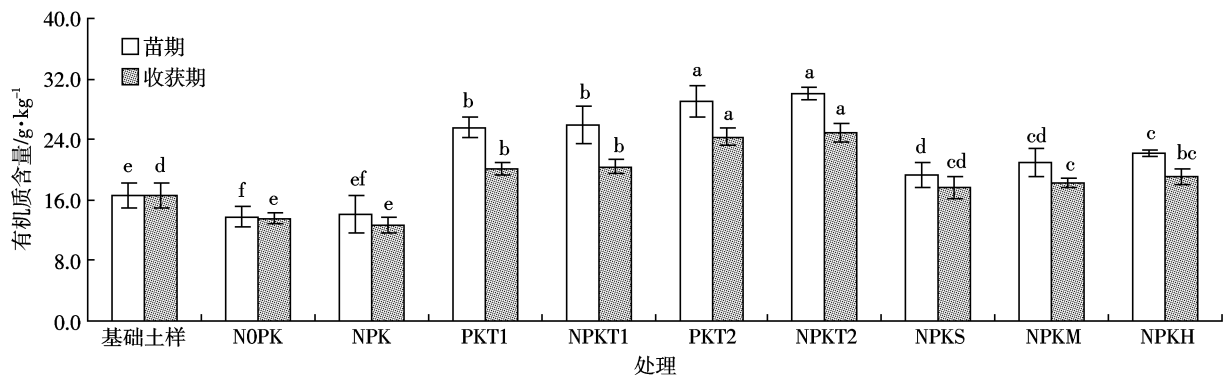
含量的提高最为突出,施用生物黑炭 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 比 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提高幅度更大;与试验前基础土壤相比,施入生物黑炭 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 苗期分别增加土壤有机质 $9.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提高了 55.77% 和 80.79%;收获期分别增加了 $3.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提高幅度 22.77% 和 49.80%。氮肥配合生物黑炭施用提高有机质的效果与单施生物黑炭相同。秸秆还田(NPKS)、有机肥(NPKM)和腐植酸(NPKH)处理也显著提高了土壤有机质含量($P < 0.05$),与试验前基础土壤对比,苗期和收获期其增加量分别为 $2.63 \sim 5.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.51 \sim 8.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,提高幅度分别在 1.04%~2.47% 和 4.14%~5.57% 之间,但其增加量显著低于生物黑炭处理。

2.1.2 土壤氮素含量

从图 2 可以看出,施肥处理土壤全氮含量均高于试验前基础土壤,苗期增加量在 $0.003 \sim 0.242 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间,提高幅度在 0.41%~35.13% 之间;收获期增加量在 $0.018 \sim 0.110 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间,提高幅度介于 2.62%~16.03% 之间。与不施氮肥(NOPK)的对照相比,苗期增加量在

$0.075 \sim 0.314 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,提高幅度在 12.15%~50.94% 之间;收获期增加量 $0.086 \sim 0.178 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,提高幅度介于 13.86%~28.73% 之间。生物黑炭处理土壤全氮含量以炭和配合氮肥的施用量而递增,各生物黑炭处理比施氮处理(NPK)全氮增加量在 $0.029 \sim 0.239 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,提高了 4.19%~34.58%,配合施用氮肥下土壤全氮增加更为明显($P < 0.05$)。

从图 3 可以看出,各处理玉米生长收获期土壤碱解氮含量小于苗期土壤碱解氮含量,收获期土壤碱解氮含量比苗期低在 $1.77 \sim 28.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,降低了 2.80%~47.90%;施氮处理和各改良剂处理玉米苗期土壤碱解氮含量高于试验前基础土壤,分别增加在 $1.97 \sim 12.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.65 \sim 13.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;提高了 3.28%~21.13% 和 4.47%~22.53%。而在玉米收获期,不施氮处理和单施生物黑炭 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理土壤碱解氮明显低于试验前($P < 0.05$),降低了 $2.77 \sim 11.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而施生物黑炭 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理则显著高于实验前($P < 0.05$),增加量在 $1.50 \sim 7.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;不同生物黑炭处理间在苗期和收获期都表现出氮肥配



图中同一时期不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理土壤有机质含量的变化

Figure 1 Dynamical change of soil organic C at different treatment

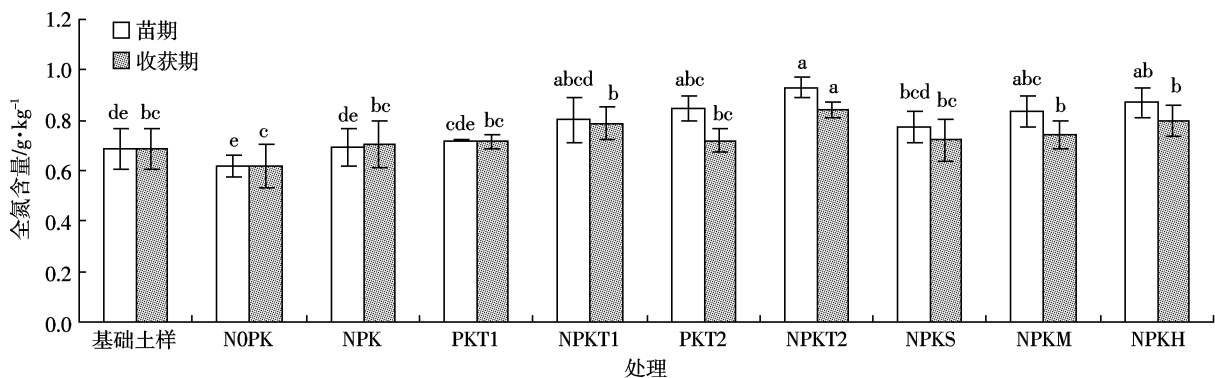


图 2 不同处理土壤全氮含量的变化

Figure 2 Dynamical change of soil total N at different treatment

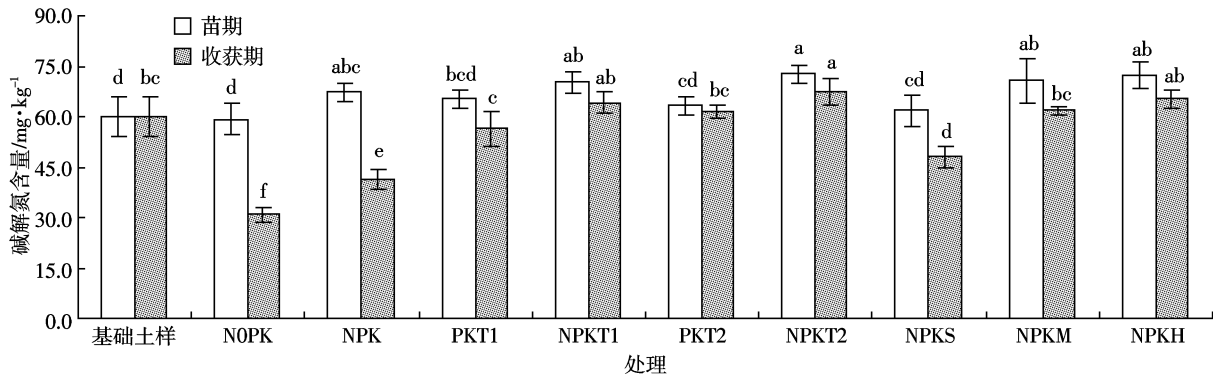


图3 不同处理土壤碱解氮含量的变化

Figure 3 Dynamical change of soil hydrolysis-N at different treatment

合下高于单施处理,表现在 $\text{NPKT1} > \text{PKT1}$ 和 $\text{NPKT2} > \text{PKT2}$ 。

2.2 生物黑炭改良剂对玉米生长的影响

从图4可以看出,不同处理间玉米株高差异不明显。与对照处理(NOPK)相比,生物黑炭处理差异显著($P < 0.05$),与其他改良剂相比处理差异不显著。但是,无论有无配施氮肥,生物黑炭处理玉米株高显著高于对照处理($P < 0.05$),增加了18~20 cm,提高了7%~8%,但氮肥配施和生物黑炭不同用量的处理间差异不显著。这里可以看出,配施氮肥和施用量高于 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 对玉米株高不再有影响。

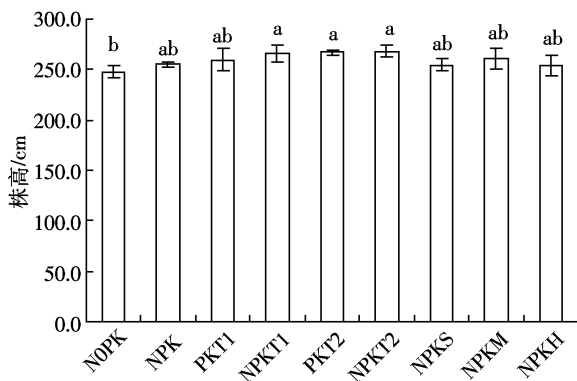


图4 不同处理玉米株高的变化

Figure 4 Changes of maize plant height at different treatment

从图5可以看出,与对照处理NOPK相比,NPK、生物黑炭和其他改良剂处理对于玉米的茎粗的影响差异不显著,说明施用生物黑炭(PKT1和PKT2)和施用生物黑炭同时加氮(NPKT1和NPKT2)以及秸秆还田(NPKS)、有机肥(NPKM)和腐植酸肥料(NPKH)处理对玉米茎粗的影响不大。

不同处理下玉米根茎生物量变化见表2。可以看出,施氮肥和生物黑炭及其他改良剂都能提高玉米根

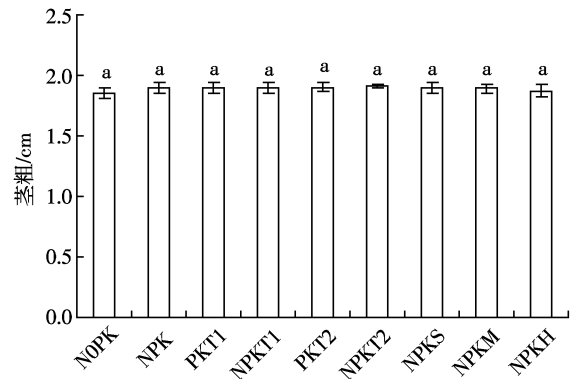


图5 不同处理玉米茎粗的变化

Figure 5 Changes of maize stem diameter at different treatment

和茎生物量,但不同处理间表现各异。从表中可以看出,与对照处理(NOPK)相比,不同用量的生物黑炭处理(T1和T2)玉米根重提高了28%~48%,茎重提高了23%~31%。与玉米株高的结果相似。单施生物黑炭(PKT1和PKT2)和配施氮肥(NPKT1和NPKT2)间无显著差异,且两个用量间差异仍未达显著水平。同时,从不同处理间根冠比的变化可以看出,PKT1、NPKT1、PKT2、NPKT2、NPKS、NPKM和NPKH均降低了玉米的根冠比,促进了玉米根系的生长,有利于玉米产量的提高。

2.3 对玉米产量性状的影响

从表3可以看出,与对照处理NOPK相比,不同施肥处理和改良剂处理都提高了玉米单穗籽粒重、千粒重和产量。不同处理的单穗籽粒重提高幅度介于6%~8%,处理间差异不显著;不同用量生物黑炭处理间差异也不显著,说明施用生物黑炭 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上和是否配施氮肥对玉米单穗籽粒重的增加影响不明显;不同改良剂施肥处理间玉米千粒重没有显著差异;而不同生物黑炭处理之间差异不显著,说明在施用生物黑炭

表 2 不同处理玉米根茎重以及根冠比的变化

Table 2 The changes of weight in maize rhizome and root-shoot ratio at different treatment

处理编码	根重/g	茎重/g	根冠比
NOPK	30.02±5.29c	112.07±1.51d	1:(3.73±0.70)a
NPK	33.08±1.07c	119.22±9.03cd	1:(3.60±0.38)a
PKT1	44.45±2.74a	146.26±1.21a	1:(3.29±0.44)a
NPKT1	33.75±1.97c	120.08±5.51cd	1:(3.56±0.11)a
PKT2	41.30±0.32ab	143.89±18.20ab	1:(3.48±0.15)a
NPKT2	40.06±1.27b	132.48±5.20abc	1:(3.31±0.22)a
NPKS	34.18±2.63c	125.60±13.05bc	1:(3.67±0.37)a
NPKM	38.53±1.22b	137.76±0.25ab	1:(3.58±0.47)a
NPKH	41.46±2.32ab	139.97±4.09ab	1:(3.38±0.06)a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理间差异($P<0.05$)。下同。

表 3 不同处理玉米产量的变化

Table 3 The changes of maize yield at different treatment

处理	单穗籽粒重/g	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
NOPK	158.42±14.75b	288.96±4.04d	9 931.98±11.68e
NPK	167.88±14.53a	292.31±2.42bcd	10 072.80±69.35d
PKT1	168.84±4.95a	292.83±4.04bcd	10 130.67±62.07cd
NPKT1	169.22±3.98a	295.32±1.79abc	10 153.29±42.53cd
PKT2	170.81±9.28a	296.76±4.51ab	10 248.73±27.59ab
NPKT2	171.47±6.10a	298.10±4.65a	10 288.15±97.25a
NPKS	165.92±15.28ab	291.31±6.43cd	10 090.32±45.27cd
NPKM	167.91±7.47a	293.38±1.58abcd	10 176.45±48.27bc
NPKH	164.50±5.48ab	290.97±2.09cd	10 146.21±37.38cd

等量的情况下,追施氮肥对玉米千粒重的影响不大。其他改良剂(NPKS、NPKM 和 NPKH)之间差异不显著,且对千粒重的贡献要低于生物黑炭处理。

从玉米产量来看,与对照处理 NOPK 相比,不同处理都能显著提高玉米产量($P<0.05$),处理间产量差异比千粒重明显。不同改良剂处理间玉米产量无显著差异,且生物黑炭处理的产量效应高于 NPKS、NPKM 和 NPKH 改良剂处理。从不同生物黑炭处理来看,PKT1、NPKT1 以及 PKT2、NPKT2 处理之间,玉米产量无显著性差异,而 PKT2 和 NPKT2 处理施用 40 t·hm⁻² 生物黑炭要大于 PKT1 和 NPKT1 施用 20 t·hm⁻² 生物黑炭,说明增加生物黑炭施用量能够提高玉米产量,而等量生物黑炭处理上追施氮肥对玉米产量的影响不显著。

3 讨论

生物黑炭是化石燃料或生物体不完全燃烧产生

的一种非纯净碳的混合物,含有 60%以上的碳^[12],目前用于固碳减排的生物黑炭是指各种作物秸秆在无氧条件下高温热解后的固态产物的统称^[4]。已有的研究表明,生物黑炭施用于土壤能快速提升土壤碳库,改善土壤质量,提升作物生产力^[13-14]。本研究表明,施用生物黑炭能够显著提高土壤有机质含量,施入生物黑炭 20 t·hm⁻² 和 40 t·hm⁻²,在玉米生育期结束后,与基础土壤相比,分别增加土壤有机质 3.78 g·kg⁻¹ 和 8.28 g·kg⁻¹,提高了 22.77%和 49.80%。秸秆还田、羊粪和腐植酸也能增加土壤有机质含量,但对土壤有机质含量的提升低于生物黑炭。施生物黑炭和同时追施氮肥之间变化不明显,说明施用生物黑炭可以减少氮肥施用量^[15]。秸秆还田、羊粪和腐植酸肥料也增加了玉米产量,但增加效果要低于生物黑炭。玉米生育期结束后,施用生物黑炭能够增加土壤全氮和碱解氮含量,这可能与生物黑炭对 NH₃ 和 NO₃⁻ 的吸附特性,从而降低了农田土壤氮的挥发所致^[16-17],但其增加量与施用量并不一定成线性关系。

生物黑炭具有良好的物理性质和养分调控作用,可以显著促进植株的生长,提高作物的生产力^[18],Glaser^[19]研究表明施用生物黑炭作物的生物量比对照提高 2 倍,Baronti^[20]对黑麦草的试验说明施用生物黑炭,黑麦草的生物量比对照提高 20%以上。本研究表明,施用生物黑炭后,能够增加玉米株高、茎粗、玉米地上部茎秆和地下部根的生物量,降低了玉米的根冠比,追施氮肥对玉米农艺性状影响不大,说明施用生物黑炭提高了土壤养分的有效性,特别是氮肥的有效性,因此在不施用氮肥的情况下也能提高玉米的生理指标和生物量。秸秆还田、羊粪和腐植酸肥料的效果要低于生物黑炭。

生物黑炭施用后,增加了玉米单穗重、千粒重和产量,玉米产量比不施肥和单施氮分别增加了 273.23 kg·hm⁻² 和 132.41 kg·hm⁻²,提高了 2.75%和 1.31%,这与 Chan^[21]的研究结果相似,但产量提高量较低,这可能与新疆特殊的气候条件和土壤类型有关。

4 结论

施用生物黑炭、秸秆、羊粪、腐植酸等有机肥肥料能够提高土壤有机质含量,但生物黑炭的效果较其他有机肥料明显。同时施用生物黑炭在不追加氮肥的情况下,也能提高玉米农艺性状和增加玉米的产量,起到了节本增效的作用,减少了氮肥的使用,对生态环境也起到了保护作用,但施入生物黑炭对产量的提高

幅度不是很大,是否具有长期的改良效应还有待试验进一步的观察。

参考文献:

- [1] 黄鸿翔. 我国土壤资源现状、问题及对策[J]. 土壤肥料, 2005(1):3-6.
HUANG Hong-xiang. The status, problem and counter measures of soil resources in China[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(1):3-6.
- [2] 马 骥. 中国农户秸秆就地焚烧的原因:成本收益比较与约束条件分析——以河南省开封县杜良乡为例[J]. 农业技术经济, 2009(2):77-84.
MA Ji. Reasons on burning straw in situ mainland farmers: Cost-benefit comparison and analysis of constrains-Taking Duryan as an example in Kaifeng, Henan Province[J]. *Agricultural Technology and Economy*, 2009(2):77-84.
- [3] Pan G X, Pete Smith, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:344-348.
- [4] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Taihu Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2010, 139(4):469-475.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:25-114.
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2000:25-114.
- [6] 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.
- [7] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(10):143-144.
- [8] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11:403-427.
- [9] Sohi S, Loez C E, Krull E, et al. Biochar's roles in soil and climate change: A review to guide future research [R]. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 2009:64.
- [10] Kei M, Toshitatsu M, Yasuo H, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95:255-257.
- [11] Iyobe T, Asada T, Kawata K, et al. Comparison of removal efficiencies for ammonia and amine gases between woody charcoal and activated carbon[J]. *Journal of Health Science*, 2004, 50:148-153.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Sci Soc*, 2006, 70:1719-1730.
- [13] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31:669-678.
- [14] Baronti S, Alberti G, Genesio L, et al. Effects on soil fertility and on crops production[C]. 2nd International Biochar Conference-IBI September 8-10 Newcastle-Gateshead, UK.
- [15] Chan K Y, Zwieten V L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46:437-444.
- [16] Demirbas A. Production and characterization of biochars from biomass via pyrolysis[J]. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2006, 28(5):413-422.
- [17] Bridgwater T. Biomass for Energy[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(12):1755-1768.
- [18] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (4):394-400.
PAN Gen-xing, ZHANG A-feng, ZOU Jian-wen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendments to croplands: An option for low carbon agriculture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):394-400.
- [19] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤的意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2459-2463.
ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. 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.
- [20] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Earthscan, 2009:1-448.
- [21] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5):282-289.
PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5):282-289.