

DOI: 10.5846/stxb201312313071

冯爱青, 张民, 李成亮, 杨越超, 陈宝成. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5269-5277.

Feng A Q, Zhang M, Li C L, Yang Y C, Chen B C. Effects of straw and straw biochar on wheat nutrient uptake and enzyme activity in brown soil. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5269-5277.

秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响

冯爱青^{1,2}, 张民^{1,*}, 李成亮¹, 杨越超¹, 陈宝成¹

1 土壤资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心, 国家化肥质量监督检验中心, 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:通过小麦盆栽试验,研究了玉米秸秆及其秸秆黑炭施加对小麦养分吸收利用和棕壤酶活性的影响。试验设对照(CK),黑炭(B),秸秆还田(S),尿素(U),尿素+黑炭(UB)及尿素+秸秆还田(US)6个处理,各处理3次重复。结果表明:无氮肥施入下,B处理较CK和S处理籽粒产量显著提高99.4%和77.7%,小麦地上部氮、磷、钾吸收累积量分别显著提高94.1%—140.9%,55.4%—66.3%和53.1%—72.6%;有氮肥施入下,UB和US处理较U处理提高籽粒产量8.2%—8.8%,小麦地上部氮、磷、钾吸收累积量分别显著提高14.3%—27.8%,19.6%—30.9%和24.4%—40.9%。秸秆及秸秆黑炭施加处理的氮素利用率显著提高21.4%—41.7%。黑炭施加显著提高土壤有机碳、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和速效钾含量;在施氮条件下,秸秆还田显著提高土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量;秸秆及黑炭施加对有效磷含量无显著影响。秸秆还田显著提高了土壤脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶和中性磷酸酶活性;施加黑炭也明显提高了土壤脱氢酶和脲酶活性,但抑制过氧化氢酶和中性磷酸酶活性。土壤脲酶活性与土壤有机碳、无机氮含量呈显著正相关,表明土壤酶可反映土壤肥力水平。

关键词:秸秆黑炭; 秸秆还田; 养分吸收利用; 土壤酶活性; 产量

Effects of straw and straw biochar on wheat nutrient uptake and enzyme activity in brown soil

FENG Aiqing^{1,2}, ZHANG Min^{1,*}, LI Chengliang¹, YANG Yuechao¹, CHEN Baocheng¹

1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, National Center for Quality Supervision & Testing of Fertilizers, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Biochar made from crops straw is widely used as a great soil ameliorant that improves soil properties, protects soil environment, and enhances wheat growth. In this study, a potted wheat experiment was conducted to study the effects of corn straw and corn straw biochar on wheat nutrient uptake and utilization, yield, and enzyme activities in brown soil. Six treatments were set up with three replications as follows: control (CK), biochar (B), straw (S), urea (U), Urea + biochar (UB), and Urea + straw (US). In this study, the biochar was made from corn straw at 500 °C under anaerobic conditions. The results demonstrated that compared with the treatments of CK and S, the yield of B treatment was significantly increased by 99.4% and 77.7%, and the amount of accumulated N, phosphorus (P), and potassium (K) in the wheat aboveground biomass significantly increased by 94.1%—140.9%, 55.4%—66.3%, and 53.1%—72.6%,

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD11B01, 2011BAD11B02); 国家“948”重点项目(2011-G30); 山东省自主创新成果转化重大专项(2012ZHZX1A0408)

收稿日期:2013-12-31; **网络出版日期:**2014-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: minzhang-2002@163.com

respectively. However, application of N fertilizer significantly increased the yield of UB and US treatments by 8.2%—8.8% and the amount of accumulated N, P, and K in wheat aboveground biomass increased by 14.3%—27.8%, 19.6%—30.9%, and 24.4%—40.9%, respectively, compared with the treatment of U. The efficiency of N use in treatments of UB and US increased by 21.4%—41.7% compared with the treatment of U; however, the enhancement of N use efficiency was higher in US than in UB. Biochar application significantly increased the content of organic carbon (C), $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and available K in soil. Only does soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content have significantly increased in straw incorporation. In the mature stage of wheat, the organic C content in the soil under the treatments of B and UB increased by 34.9%—54.2% in comparison with other treatments without biochar application. Meanwhile, there was no significant difference in soil organic C content under the treatment with straw. In this stage, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in soil of UB treatment was also increased by 10.9%—23.5%, which was higher than in other treatments. From heading stage to maize stage, compared with the treatments of US and U, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content of UB treatment increased by 30.9%—85.3% and 67.5%—126.7%, respectively. From seedling stage to mature stage, the available K content in soil of UB treatment increased by 23.3%—86.0% in comparison with US treatment. Nevertheless, there was no pronounced effect of biochar and straw on the available P content in soil. Moreover, straw incorporation significantly improved soil dehydrogenase, catalase, urease, and neutral phosphatase activities. Biochar application significantly enhanced soil dehydrogenase and urease activities, but it inhibited soil catalase and neutral phosphatase activities. The positive correlation between soil urease and organic C and inorganic N indicated that soil enzymes reflected the soil fertility level. In conclusion, a long term *in-situ* study is of great importance to investigate the long-term effects of straw incorporation and biochar on soil properties and yield of crops.

Key Words: straw biochar; straw incorporation; soil nutrient uptake and utilization; soil enzyme activity; yield

作物秸秆含有丰富的营养元素,其利用方式已经从焚烧逐步转向秸秆还田,秸秆还田可以减少由秸秆焚烧所引起的环境污染,同时提高农村养分资源的循环利用^[1]。据报道,秸秆焚烧可造成 0—5 cm 土层细菌、放线菌、真菌等微生物数量减少 43%—80%,土壤中多种酶活性显著降低^[2]。秸秆还田可以提高土壤养分含量,改良土壤理化性状,提高作物产量^[3-5]。秸秆还田可提高土壤水分利用率和蓄水能力,促进作物的光合作用,进而使作物增产^[6]。

作物秸秆可以在缺氧或者少氧的条件下不完全燃烧制成一种富有孔隙结构、含碳量高的生物质黑炭^[7]。研究表明,由于黑炭的这种多孔的特殊结构,施用黑炭可以增加土壤的孔隙度^[8],吸附和保持水分^[9];提高土壤 pH 值,增大盐基交换量,有效调控土壤中营养元素的循环^[10-11],提高土壤中微生物的含量^[12-13]。但是,陈心想等^[14],研究表明:黑炭对小麦和糜子增产效应不稳定,在最高量 20 t/hm² 水平时产生抑制作用。施用生物炭对土壤酶活性的影响研究较少,主要集中在与碳、氮物质循环相关的少数几种酶^[15]。

近年来,由秸秆转化的黑炭已成为农业可持续发展的研究热点。研究报道多集中于秸秆还田及黑炭对土壤物理性质、土壤养分及作物生长的影响,而关于秸秆还田及秸秆黑炭对土壤养分和土壤酶的变化及其相关性研究较少。土壤酶对土壤受到的干扰比较敏感,能够反映不同条件下土壤质量的变化^[16]。本研究通过小麦-玉米轮作体系,对秸秆及秸秆黑炭施用后小麦各生育期土壤养分利用状况、作物产量及土壤酶活性等进行研究,试图探明秸秆及秸秆黑炭对小麦产量、土壤养分与土壤酶的效应差异,为秸秆炭化还田在农业上的应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验始于 2011 年 10 月,于山东农业大学南校区“土肥资源高效利用国家工程实验室”中心试验站内(36°09'14"N, 117°09'01"E)进行,冬小麦-夏玉米轮作,一年两熟。2012 年 10 月夏玉米收获后种植小麦,试验

时间为 2012 年 10 月至 2013 年 6 月。供试土壤取自山东农业大学南校区试验基地 0—20 cm 耕层土壤,土壤类型为棕壤,根据中国土壤系统分类命名为:普通简育湿润淋溶土(Typic-Hapli-Udic Argosols),质地为粉壤(含粘粒 10.5%,砂粒 35.5%,粉粒 54.0%)。土壤基本理化性质为:有机质 12.1 g/kg,全氮 0.5 g/kg,NO₃⁻-N 8.4 mg/kg,NH₄⁺-N 11.3 mg/kg,有效磷 38.9 mg/kg,速效钾 78.7 mg/kg,pH 值 7.28。供试肥料为普通尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 14%)、氯化钾(含 K₂O 60%)。生物炭为玉米秸秆黑炭(500 °C 缺氧烧制,全 N 18.1 g/kg,全 P 11.5 g/kg,全 K 27.5 g/kg,有机碳含量 621.5 g/kg,水炭比为 20:1^[17]测定 pH 值为 9.6)。还田秸秆为前茬玉米秸秆,将秸秆晒干,打碎成 1 cm 左右的小块。本试验使用的陶土盆直径为 31 cm,高 36 cm,盆底层铺沙 5 kg,每盆装土 25 kg。供试小麦品种为“济麦 22”,生育期 240 d 左右,每盆小麦播 30 粒(小麦发芽率为 98%,按每亩 10 kg 播种)。

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理,分别为:1)空白对照 CK;2)黑炭处理 B;3)秸秆还田处理 S;4)尿素处理 U;5)尿素+黑炭处理 UB;6)尿素+秸秆还田处理 US。具体施用量列于表 1 中,施氮处理 N 施用量为 450 kg/hm²,各处理磷肥、钾肥施用量均相同,施磷(P₂O₅)0.107 g/kg 土(P₂O₅240 kg/hm²),钾(K₂O)0.08 g/kg 土(K₂O 180 kg/hm²),各处理均 3 次重复。各肥料、玉米秸秆黑炭及打碎的玉米秸秆与土混匀后装入盆中,作基肥在播种前一次性施入。尿素处理中尿素按农民习惯施肥分两次施入,50%作基肥在播种前施入,50%在小麦拔节期施入。小麦盆栽置于室外,与大田条件相同。水分管理:保持田间持水量的 60%—70%,用重量法补足水分。2012 年 10 月 8 日播种,2013 年 6 月 1 日收获。

表 1 小麦盆栽试验施肥方案

Table 1 Fertilization design for potted maize experiment

编号 Number	处理 Treatments	代号 Abbreviations	N/(g/kg)	黑炭/% Biochar	秸秆还田/% Straw
1	氮肥空白对照	CK	0	0	0
2	黑炭,不施氮肥	B	0	0.5	0
3	秸秆还田,不施氮肥	S	0	0	0.4
4	尿素处理	U	0.2	0	0
5	尿素+黑炭处理	UB	0.2	0.5	0
6	尿素+秸秆还田处理	US	0.2	0	0.4

黑炭及秸秆还田施用量为质量比;CK: 氮肥空白对照 Control;B: 黑炭处理 Biochar;S: 秸秆还田处理 Straw;U: 尿素处理 Urea;UB: 尿素+黑炭处理 Urea+biochar;US: 尿素+秸秆还田处理 Urea+straw

1.3 测定项目与方法

土壤取样生育期及时间为:小麦苗期(2012 年 10 月 31 日,施肥播种后 23 d)、返青期(2013 年 3 月 16 日,施肥播种后 159 d)、拔节期(2013 年 4 月 8 日,施肥播种后 182 d)、开花期(2013 年 4 月 27 日,施肥播种后 201 d)、灌浆期(2013 年 5 月 11 日,施肥播种后 215 d)、成熟期(2013 年 5 月 29 日,施肥播种后 233 d)。取样方法为:在小麦植株周围均匀的取 3 个点,采样土层深度为 0—20 cm,将土样充分混匀带回实验室。一部分鲜土立即放入冰箱 4 °C 保存,测定土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 及土壤脱氢酶,在采样后 48 h 内测定完毕;一部分自然风干、磨细,过 2 mm 及 0.25 mm 筛。

土壤性质的测定方法:土壤 pH 值采用 pH 计(PB-10, Satorius AG, 德国)测定,水土比为 2.5:1;土壤电导率(EC)采用电导率仪(DDSJ-308A, 上海精密科学仪器有限公司)测定,水土比为 2.5:1;土壤质地采用微吸管法(美国制);土壤全氮采用半自动凯氏定氮仪测定;土壤鲜样中无机氮为 0.01 mol/L CaCl₂提取的土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 二者之和,土壤浸提液的 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 含量采用流动注射分析仪(AA3, BRAN+LUEBBE, 德国)测定;土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼蓝比色法;土壤速效钾采用 pH 值 7.0 醋酸铵浸提-火焰光度计法测定^[18]。测定所取土样土壤酶活性,土壤脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶、中

性磷酸酶活性分别采用三苯基甲替比色法、高锰酸钾滴定法、苯酚钠比色法、磷酸苯二钠比色法测定^[19]。

小麦收获后,植株秸秆及小麦籽粒置于烘箱中,105 ℃杀青 15 min,65 ℃烘至恒重后称重、磨细。分别采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法及火焰光度计法测定秸秆及籽粒中全氮、全磷、全钾含量^[18]。

试验数据利用 Excel 2003 和 SAS 8.0 软件进行处理和统计分析,不同处理内采用 ANOVA 方法进行方差分析,不同处理间的多重比较采用 Duncan's Multiple Range Test 方法检验各处理平均值在 $P < 0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 秸秆黑炭及秸秆还田对作物产量及养分吸收的影响

添加黑炭及秸秆还田对籽粒、秸秆产量,氮、磷、钾养分吸收总量及氮素利用率具有显著影响(表 2)。施氮情况下,UB 处理与 US 处理籽粒产量差异不显著,较 U 处理显著提高 8.2%—8.8%;无氮情况下,B 处理籽粒产量较 CK 和 S 处理显著提高 99.4%和 77.7%,CK 和 S 处理籽粒产量差异不显著。U、UB 和 US 处理秸秆产量差异不显著,但较 CK、B 和 S 处理显著提高 16.2%—152.1%;B 处理秸秆产量较 CK 和 S 处理显著提高 67.9%和 54.3%。

各处理氮素吸收总量依次为:US> UB> U> B> S> CK, UB 和 US 处理较 U、B、S、CK 处理分别显著提高 14.3%—242.1%和 27.8%—282.5%,磷吸收总量较 U、B、S、CK 处理分别显著提高 19.6%—99.0%和 30.9%—117.8%,钾吸收总量分别显著提高 24.4%—120.8%和 40.9%—150.0%;B 处理氮、磷、钾吸收总量较 S 和 CK 处理分别显著提高 94.1%—140.9%,55.4%—66.3%和 53.1%—72.6%。各处理氮素利用率依次为:US> UB> U,US 和 UB 处理氮素利用率较 U 处理显著提高 41.7%和 21.4%;US 处理氮素利用率较 UB 处理显著提高 16.7%。

表 2 黑炭及秸秆还田对小麦产量及养分吸收的影响

Table 2 Effects of biochar and straw incorporation on the yield of wheat and nutrient uptake

处理 Treatments	产量 Yield (g/盆)		养分吸收总量 Total amount of nutrient uptake (g/盆)			氮素利用率/% N use efficiency
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	N	P	K	
CK	37.83d	36.41c	0.92f	0.38c	2.03d	—
B	63.50c	72.59b	2.23d	0.64b	3.50c	—
S	41.15d	40.85c	1.15e	0.41c	2.29d	—
U	70.99b	84.37a	2.77c	0.64b	3.60c	36.85c
UB	81.96a	91.77a	3.16b	0.76a	5.08a	44.74b
US	82.19a	91.28a	3.53a	0.83a	4.48b	52.21a

在同一列中的平均值,凡尾部标有不同的字母表示它们之间差异显著($P < 0.05$);氮素利用率(%)=(施氮区作物吸氮量-氮空白作物吸氮量)/作物施氮量×100%

添加黑炭及秸秆还田对小麦籽粒及秸秆中养分含量具有一定影响(表 3)。各处理籽粒中氮含量依次为:US> UB、U、B> S> CK,US 处理籽粒氮含量较其它处理显著提高 8.8%—61.3%,B 处理籽粒氮含量较 S、CK 处理分别显著提高 15.6%和 38.3%;各处理籽粒中磷、钾含量差异不显著。US 处理秸秆中氮含量较 B、S、CK 处理显著提高 47.9%—138.0%,与 UB、U 处理差异不显著;S 处理秸秆中磷的含量最高,较 U 处理显著提高 56.9%;S、UB 和 CK 处理秸秆中钾含量显著提高 12.7%—33.9%。S 处理秸秆中氮含量较低,U 处理秸秆中磷、钾含量较低。

2.2 秸秆黑炭及秸秆还田对土壤养分的影响

试验前,供试土壤较贫瘠,土壤有机碳含量较低,小麦-玉米轮作提高了土壤有机碳的含量(图 1)。添加黑炭显著影响了土壤有机碳的含量,小麦成熟期,添加黑炭处理 B 及 UB 处理土壤中有机碳含量较其它处理显著提高 34.9%—54.2%,秸秆施加较无物料添加处理土壤有机碳含量差异不显著。

表 3 黑炭及秸秆还田对小麦籽粒及秸秆中养分含量的影响

Table 3 Effects of biochar and straw incorporation on the nutrient content of wheat grain and straw

处理 Treatments	籽粒 Grain			秸秆 Straw		
	N/(g/kg)	P/(g/kg)	K/(g/kg)	N/(g/kg)	P/(g/kg)	K/(g/kg)
CK	19.84d	5.87a	12.58a	4.80cd	4.42ab	42.71a
B	27.44b	5.11a	12.47a	6.70bc	4.29ab	37.34b
S	23.73c	5.14a	11.64a	4.164d	4.87a	44.33a
U	28.71b	5.28a	11.41a	8.66ab	3.11c	33.11c
UB	29.40b	5.32a	13.25a	8.17ab	3.55bc	43.47a
US	31.99a	5.47a	12.45a	9.91a	4.19ab	37.89b

在同一列中的平均值, 凡尾部标有不同的字母表示它们之间差异显著 ($P < 0.05$)

添加黑炭及秸秆还田显著影响了土壤中无机氮的含量(图2)。苗期至拔节期, 添加黑炭 UB 处理显著提高了土壤中铵态氮的含量; 由于 U 处理在拔节期后追肥 50%, 抽穗期土壤中铵态氮的含量显著提高, U、UB 及 US 处理土壤中铵态氮的含量差异不显著, 但成熟期时, UB 处理土壤中铵态氮的含量较其它处理显著提高 10.9%—23.5%(图1)。各处理土壤硝态氮的含量在小麦各生育期差异十分显著。苗期至抽穗期, 各处理土壤硝态氮的含量依次为: UB> US> B、U> CK、S; 灌浆期及成熟期, UB> US、U> B、S、CK。整个生育期, B 处理土壤中硝态氮的含量较 CK、S 处理显著提高; 抽穗期至成熟期, UB 处理土壤中硝态氮的含量较 US、U 处理分别显著提高 30.9%—85.3%和 67.5%—126.7%(图2)。

如图3所示, 小麦生育期中 CK 处理土壤有效磷含量较高; 拔节期, U 处理土壤有效磷含量显著升高。整个生育期中, B、S、UB 及 US 处理间土壤有效磷含量差异趋于不显著。拔节期, UB 处理较 U 和 US 处理土壤有效磷含量显著提高, 但在其它时期, UB、US 及 U 处理土壤有效磷含量差异不显著。

各处理土壤中速效钾的含量在各生育期显著不同, 黑炭施入显著提高了土壤中速效钾的含量(图4)。苗

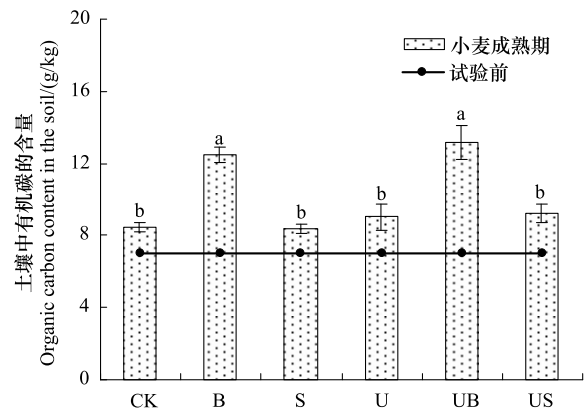


图1 黑炭及秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

Fig.1 Effects of biochar and straw incorporation on soil organic carbon content

CK: 氮肥空白对照 Control; B: 黑炭处理 Biochar; S: 秸秆还田处理 Straw; U: 尿素处理 Urea; UB: 尿素+黑炭处理 Urea+biochar; US: 尿素+秸秆还田处理 Urea+straw

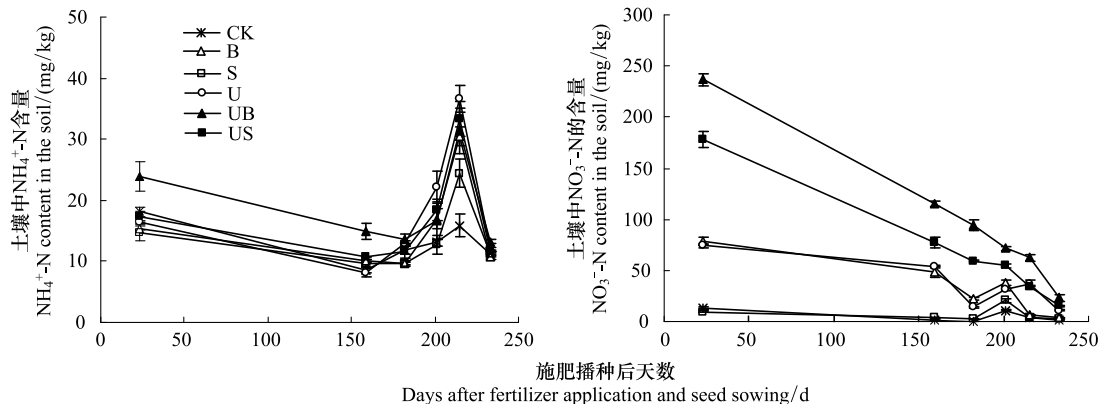


图2 黑炭及秸秆还田对土壤中无机氮含量的影响

Fig.2 Effects of biochar and straw incorporation on soil inorganic nitrogen content

期至返青期、抽穗期至成熟期,B处理土壤速效钾含量较UB处理显著提高21.6%—31.1%;S、US、CK处理间土壤速效钾含量差异趋于不显著。苗期至成熟期,B处理土壤速效钾含量较S、CK处理显著提高29.4%—116.8%;返青期至成熟期,UB处理土壤速效钾含量较U处理显著提高22.7%—62.1%;苗期至成熟期,UB处理土壤速效钾含量较US处理显著提高23.3%—86.0%。

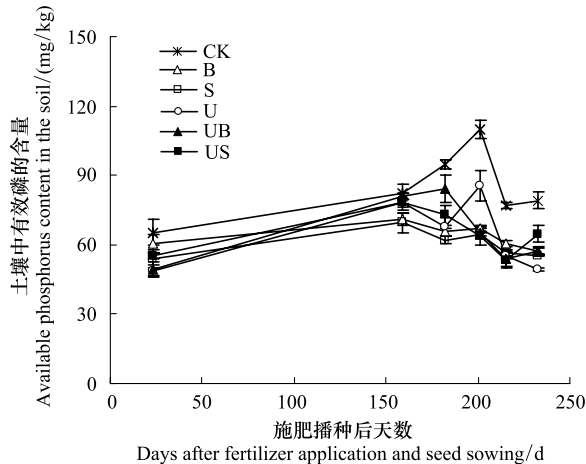


图3 黑炭及秸秆还田对土壤中有效磷含量的影响

Fig. 3 Effects of biochar and straw incorporation on soil available phosphorus content

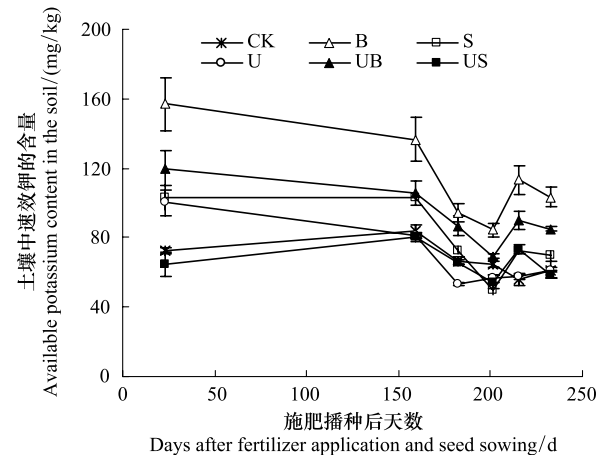


图4 黑炭及秸秆还田对土壤中速效钾含量的影响

Fig. 4 Effects of biochar and straw incorporation on soil available potassium content

2.3 秸秆黑炭及秸秆还田对土壤酶活性的影响

在小麦整个生育期中,苗期土壤脱氢酶活性最低,拔节期—抽穗期土壤脱氢酶活性达到最高(图5)。返青期至灌浆期,US处理土壤脱氢酶活性较UB、U处理分别显著提高26.6%—39.1%和27.8%—92.5%;成熟期,S、U、UB和US处理土壤脱氢酶活性差异不显著,较B和CK处理分别显著提高17.0%—33.0%和99.3%—126.5%。不施氮条件下,添加黑炭及秸秆还田处理土壤脱氢酶活性分别显著提高37.8%—125.3%和47.6%—162.6%;施氮条件下,添加黑炭在返青期、拔节期土壤脱氢酶活性显著提高38.8%和36.2%,秸秆还田处理在返青期至灌浆期土壤脱氢酶活性显著提高27.8%—75.1%。

小麦整个生育期中土壤过氧化氢酶活性的动态变化不显著(图6)。拔节期,各处理土壤过氧化氢酶活性高低依次为:S、US>B、U>CK>UB;抽穗期,B、S和US处理土壤过氧化氢酶活性较UB、CK处理显著提高5.5%—8.0%,成熟期,较U、CK处理显著提高2.4%—3.5%。灌浆期,各处理土壤过氧化氢酶活性高低依次为:S>B>US>U>UB、CK。返青期至成熟期,B和S处理土壤过氧化氢酶活性较CK处理显著提高2.9%—8.0%。拔节期至灌浆期,U和US处理土壤过氧化氢酶活性较UB处理显著提高2.5%—7.9%。

添加黑炭及秸秆还田对土壤脲酶活性影响十分显著(图7),UB和US处理土壤脲酶活性较其它处理分别显著提高21.0%—114.3%和13.9%—86.4%。苗期,各处理土壤脲酶活性高低依次为:UB、US>S、U>B、CK,B处理土壤脲酶活性较低;返青期、抽穗期及灌浆期,B、S、U处理土壤脲酶活性较UB和US处理显著降低;拔节

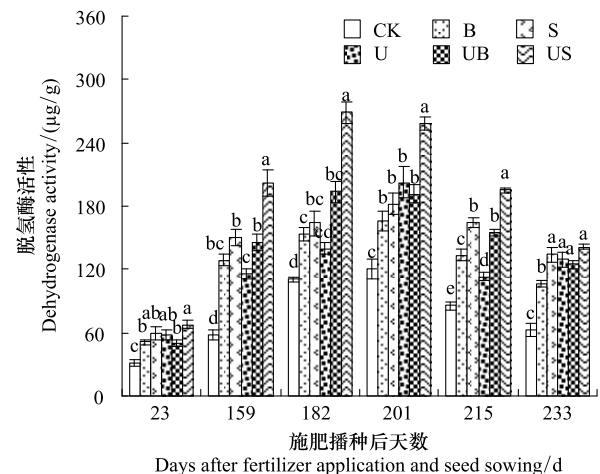


图5 黑炭及秸秆还田对土壤脱氢酶活性的影响

Fig. 5 Effects of biochar and straw incorporation on soil dehydrogenase activity

期, B 和 US 处理土壤脲酶活性差异不显著, 较 CK、S 和 U 处理显著提高; 成熟期, 各处理土壤脲酶活性依次为: UB>US>B>U>S>CK, UB 和 US 处理土壤脲酶活性显著较高。苗期至成熟期, UB 处理土壤脲酶活性较 B 处理显著提高 21.5%—71.0%, US 处理土壤脲酶活性较 S 处理显著提高 16.0%—69.1%。苗期至成熟期, UB 和 US 处理土壤脲酶活性较 U 处理分别显著提高 22.5%—72.4% 和 13.9%—49.7%。

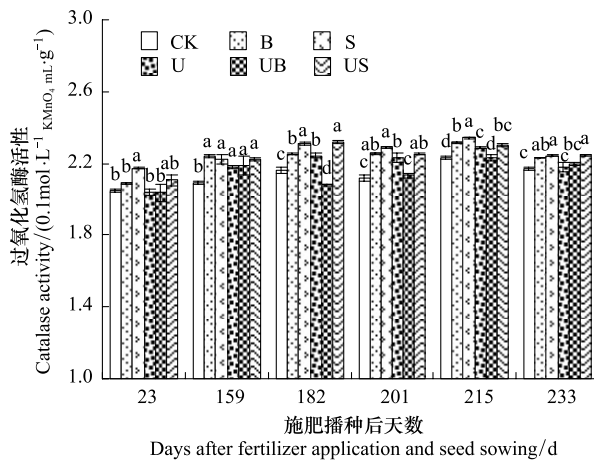


图 6 黑炭及秸秆还田对土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig.6 Effects of biochar and straw incorporation on soil catalase activity

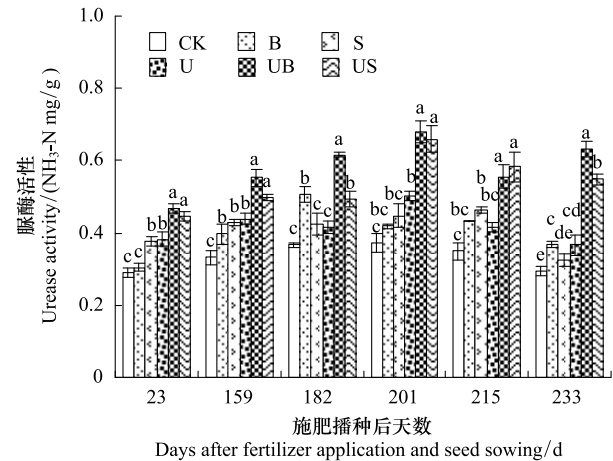


图 7 黑炭及秸秆还田对土壤脲酶活性的影响

Fig.7 Effects of biochar and straw incorporation on soil urease activity

土壤 pH 范围为 6.30—7.97, 土壤中性磷酸酶活性较强。小麦拔节期及抽穗期, 各处理土壤中性磷酸酶活性较高, 成熟期活性较低 (图 8)。在小麦整个生育期中, US 处理较其它处理土壤中性磷酸酶活性显著提高 8.2%—279.7%。返青期及成熟期, UB 处理较 B 处理土壤中性磷酸酶活性显著提高 14.0%—83.7%; 苗期至成熟期, US 处理较 S 处理土壤中性磷酸酶活性显著提高 18.4%—50.0%。返青期、灌浆期及成熟期, S 处理较 B 处理土壤中性磷酸酶活性显著提高 11.7%—88.4%。UB 处理土壤中性磷酸酶活性在苗期、

返青期较 U 处理显著提高 15.1%—31.4%, 在拔节期、灌浆期则显著降低 15.0%—16.6%; 返青期至成熟期, US 处理土壤中性磷酸酶活性较 UB 处理显著提高 16.0%—53.8%。

2.4 秸秆黑炭及秸秆还田方式下土壤酶活性及土壤养分的相关性

土壤脱氢酶能催化有机物质脱氢, 起着氢的中间转化传递作用, 其活性可作为微生物氧化还原系统的指标; 过氧化氢酶能酶促水解过氧化氢, 其活性与土壤微生物及植物根系有关, 可用来表征土壤的生化活性; 脲酶催化尿素水解成氨, 可用来表征土壤的氮素状况; 磷酸酶催化有机磷化合物矿化, 其活性高低直接影响土壤有机磷的分解转化^[20]。由表 4 可知, 土壤脱氢酶活性与土壤过氧化氢酶、脲酶、中性磷酸酶活性及土壤脲酶与中性磷酸酶活性呈极显著正相关; 土壤脲酶活性与有机碳、无机氮含量呈显著正相关, 而土壤过氧化氢酶活性与无机氮含量呈显著负相关; 土壤有效磷、速效钾含量与土壤脱氢酶、过氧化氢酶、脲酶、中性磷酸酶没有呈

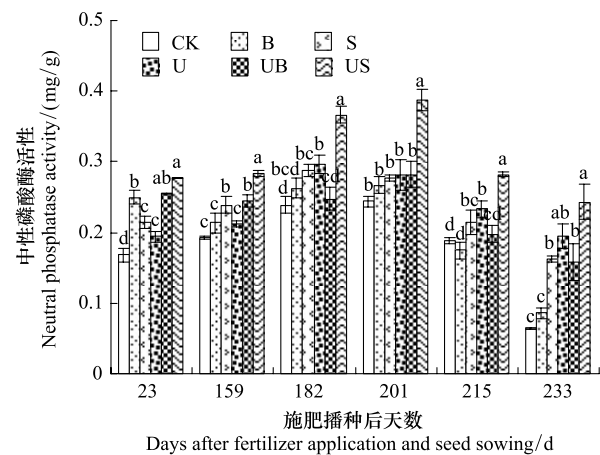


图 8 黑炭及秸秆还田对土壤中性磷酸酶活性的影响

Fig.8 Effects of biochar and straw incorporation on soil neutral phosphatase activity

现显著相关性。

表 4 土壤酶活性及土壤养分的相关性分析

Table 4 The correlation analysis between soil enzyme activities and soil nutrient

项目 Item	脱氢酶 Dehydrogenase	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	中性磷酸酶 Neutral phosphatase	有机碳 Org. C	无机氮 Inorg. N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K
脱氢酶 Dehydrogenase	—	0.6205 ***	0.6800 ***	0.6433 ***	0.1449	-0.0638	0.1580	-0.3463
过氧化氢酶 Catalase	—	—	0.2020	0.2146	0.1820	-0.4014 *	-0.1146	-0.2791
脲酶 Urease	—	—	—	0.5091 **	0.4152 *	0.3372 *	-0.0628	-0.1418
中性磷酸酶 Neutral phosphatase	—	—	—	—	-0.2344	0.3245	0.1071	-0.2063

Org. C:有机碳 Organic carbon; Inorg. N:无机氮 Inorganic nitrogen; Avail. P:有效磷 Available phosphorus; Avail. K:速效钾 Available potassium ;
n=36; *, * * 和 * * * 分别表示差异达 5%, 1% 和 0.1% 显著水平

3 讨论

试验结果显示:在施氮条件下,黑炭施加及秸秆还田处理较尿素处理籽粒分别显著增产 8.19% 和 8.77%;在不施氮条件下,黑炭施加较秸秆还田及 CK 处理籽粒及秸秆均增产显著。韩新忠等^[20]研究表明秸秆还田显著增加了土壤全氮及速效氮的含量、土壤脲酶及过氧化氢酶活性,最大增产率为 9.0%,陈心想等^[14]研究发现在新积土和瘠土中添加黑炭显著增加了土壤有机碳、无机氮含量及新积土土壤有效磷和速效钾含量,新积土糜子和瘠土小麦增产显著。尿素+黑炭及尿素+秸秆处理小麦植物体氮浓度增加,作物地上部分生物量也增加,因而总吸收氮量也显著增加。尿素+秸秆处理显著提高小麦地上部磷、钾的吸收累积量,但单施秸秆处理由于氮素亏缺,影响了磷、钾的吸收。施加黑炭虽然提高了磷、钾的吸收总量,但秸秆中磷的含量较低、钾的含量较高。可能是因为施加黑炭显著提高土壤氮、磷、钾含量,植株体对氮、钾的吸收速率大于对磷的吸收速率^[21],导致秸秆磷的浓度相对较低。CK 及 S 处理秸秆中钾的含量较高是因为两处理土壤氮素供应不足,提高钾的含量以促进植株体内氮素的运输、转化和利用^[22]。

施加秸秆黑炭带入土壤有机碳含量为 3.1 g/kg,显著提高了土壤中有机碳的含量。秸秆黑炭较秸秆已发生结构上的变化,分解率较低,能够稳定的存在于土壤中,促进了土壤碳库的稳定^[23]。秸秆黑炭本身含有较多的氮、磷、钾等养分,本试验中所添加的黑炭使土壤中 N、P、K 分别提高 0.091, 0.058 g/kg 和 0.14 g/kg,施加黑炭显著提高了土壤中铵态氮、硝态氮和速效钾含量。U 处理土壤中硝态氮含量在追施 50% 氮肥后也呈上升趋势,但其硝态氮含量显著低于 UB 和 US 处理,说明 UB 和 US 处理土壤中积累硝态氮含量较高。原因可能是施加黑炭和秸秆能够改善土壤结构,减少养分流失,同时黑炭独特的表面特性使其对土壤水溶液中的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、P、K 等营养元素具有很强的吸附作用。Laird 等^[11] 和花莉等^[24] 研究发现,添加黑炭能够显著减少总 N 和可溶性 P 的滤出量,保肥效果十分明显。张静等^[25] 研究表明,秸秆还田后土壤微生物固定 C、N 能力增强。施加黑炭及秸秆对有效磷含量的响应无效,原因可能是土壤有效磷背景值较高且磷素本身在土壤中的移动能力较差。

本研究中,添加黑炭及秸秆还田显著提高了土壤脱氢酶和脲酶活性,秸秆还田显著提高了土壤过氧化氢酶和中性磷酸酶活性。因秸秆还田提高了土壤碳、氮比,为土壤微生物提供大量可利用的有机碳,促进了微生物的繁殖^[26]。黑炭的孔隙结构容及对水肥吸附作用,给土壤微生物生长提供场所和养分^[27]。添加黑炭对土壤过氧化氢酶和中性磷酸酶活性则表现出一定的抑制作用,这可能是因为黑炭 pH 值较高,添加黑炭改变了土壤酸碱环境,抑制了土壤过氧化氢酶和中性磷酸酶活性的活性。土壤酶之间相关性说明土壤酶在土壤中的作用不仅具有专性,还表现为一定的共性;土壤酶与养分之间的相关性表明土壤酶可表征土壤肥力水平及土壤养分转化的方向^[28]。

4 结论

秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收利用及土壤酶活性具有显著影响。无氮条件下,黑炭施加处理较秸秆及空白处理增产 99.4%—77.7%;施氮条件下,黑炭及秸秆还田籽粒产量显著提高了 8.2%—8.8%。施用黑炭显著提高了小麦地上部氮、磷、钾吸收累积量,而秸秆还田仅在施氮条件下显著提高。秸秆及秸秆黑炭施加氮素利用率显著提高 21.4%—41.7%。黑炭施加显著提高了土壤养分含量,秸秆还田仅显著提高土壤中 NO_3^- -N 含量,两者对土壤有效磷含量无影响。鉴于生物炭和秸秆还田对土壤性质和作物产量的长期效应,还需对其进行长期定位试验研究。

参考文献 (References):

- [1] 杨玉爱. 我国有机肥料研究及展望. 土壤学报, 1996, 33(4): 414-422.
- [2] 陈亮, 赵兰坡, 赵兴敏. 秸秆焚烧对不同耕层土壤酶活性、微生物数量以及土壤理化性状的影响. 水土保持学报, 2012, 26(4): 118-122.
- [3] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 郝艳如, 张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
- [4] 王建武, 冯远娇, 骆世明. Bt 玉米秸秆分解对土壤酶活性和土壤肥力的影响. 应用生态学报, 2005, 16(3): 524-528.
- [5] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 高绪科. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2000, 33(4): 54-61.
- [6] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 韩清芳, 杨宝平, 侯贤清. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响. 生态学报, 2011, 31(3): 777-783.
- [7] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2004, 72(2): 243-248.
- [8] Whalley W R, Clark L J, Gowing D J G, Cope R E, Lodge R J, Leeds-Harrison P B. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying? Plant and Soil, 2006, 280(1/2): 279-290.
- [9] Asai H, Samson B K, Stephan H M, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos; 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81-84.
- [10] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [11] Laird D, Fleming P, Wang B Q, Horton R, Karlen D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [12] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. Science, 2008, 320(5876): 629-629.
- [13] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, Thies J E, O'Neill B, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Grossman J, Neves E G, Luizão F J. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. Organic Geochemistry, 2010, 41(2): 206-213.
- [14] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 张雯, 高海英. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响. 生态学报, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [15] Jin H Y. Characterization of Microbial Life Colonizing Biochar and Biochar-amended Soils. UMI, 2010.
- [16] Zimmerman A R, Ahn M Y. Organo-mineral-enzyme interaction and soil enzyme activity // Soil Enzymology. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 271-292.
- [17] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 许燕萍, 刘金山, 卑其诚, 蔺兴武, 朱建国, 谢祖彬. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713-2717.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 俞琦, 卞新民. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [21] 杨雄, 马群, 张洪程, 魏海燕, 李国业, 李敏, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 张庆, 郭保卫, 葛梦婕. 不同氮肥水平下早熟晚粳氮和磷的吸收利用特性及相互关系. 作物学报, 2012, 38(1): 174-180.
- [22] 李飒, 彭云峰, 于鹏, 张瑜, 方正, 李春俭. 不同年代玉米品种干物质积累与钾素吸收及其分配. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 325-332.
- [23] Lehmann J. A handful of carbon. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.
- [24] 花莉, 张成, 马宏瑞, 余旺. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2489-2492.
- [25] 张静, 温晓霞, 廖允成, 刘阳. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612-619.
- [26] 孙建, 刘苗, 李立军, 刘景辉, 张星杰. 免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5508-5515.
- [27] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. Biogeochemistry, 2007, 85(1): 91-118.
- [28] 叶协锋, 杨超, 李正, 敬海霞. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 445-454.