

DOI: 10.20103/j.stxb.202312092684

詹增意, 郝丽伟, 岳岐, 刘帅, 曹殿云, 陈温福, 兰宇, 钱创建. 施用生物炭对东北大豆草甸土壤理化性质及腐殖质组分的影响. 生态学报, 2024, 44(17): 7797-7806.

Zhan Z Y, Hao L W, Yue Q, Liu S, Cao D Y, Chen W F, Lan Y, Qian C J. Effect of biochar application on the physicochemical properties and humus components of soybean meadow soil in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7797-7806.

施用生物炭对东北大豆草甸土壤理化性质及腐殖质组分的影响

詹增意^{1,2}, 郝丽伟¹, 岳岐¹, 刘帅¹, 曹殿云¹, 陈温福¹, 兰宇^{1,*}, 钱创建²

1 沈阳农业大学国家生物炭研究院, 农业农村部生物炭与土壤改良重点实验室, 沈阳 110866

2 黑龙江省农业科学院经济作物研究所, 哈尔滨 150086

摘要:为评价生物炭添加对土壤理化性质、腐殖质及其腐殖化程度的改良效果,以生物炭田间定位试验为基础,设置 4 个处理:空白对照(CK)、常规施肥(NPK)、单施生物炭(B1)和化肥配施生物炭(NPK+B1),通过连续 2 年的田间试验,研究了生物炭添加对土壤理化性质和土壤胡敏酸(HA)、富里酸(FA)和胡敏素(HM)以及大豆产量的影响。结果表明:施用生物炭可短期内有效提高土壤养分,增加土壤中腐殖物质含量,提高稳定性,并改善土壤质地,提高大豆产量。其中与 CK 相比,B1 和 NPK+B1 处理的土壤理化性质提升效果较为明显,电导率(EC)提高 3.50%—98.99%、有机碳(OC)含量提高 18.01%—23.18%、碱解氮(AN)含量提高 23.48%—37.15%、全氮(TN)含量提高 14.93%—25.37%、有效磷(AP)含量提高 8.33%—110.16%、全磷(TP)含量提高 10.00%—45.00%、速效钾(AK)含量提高 6.61%—20.76%、全钾(TK)含量提高 13.24%—30.74%、大豆产量提高了 54.34%—90.36%。与 NPK 处理相比,NPK+B1 处理土壤 HA、FA 和 HM 含量分别提高了 38.62%、26.76% 和 16.45%。且通过相关性分析和主成分分析表明,土壤 pH、EC、AK、TK、TP、AN、TN、OC 和大豆产量与腐殖质存在显著的正相关关系。因此,化肥配施生物炭处理可有效改善土壤理化特性,提高土壤腐殖质组分含量,为克服大豆连作障碍,提高大豆生产能力提供理论和技术支撑。

关键词:生物炭;草甸土;理化性质;腐殖质

Effect of biochar application on the physicochemical properties and humus components of soybean meadow soil in Northeast China

ZHAN Zengyi^{1,2}, HAO Liwei¹, YUE Qi¹, LIU Shuai¹, CAO Dianyun¹, CHEN Wenfu¹, LAN Yu^{1,*}, QIAN Chuangjian²

1 National Biochar Research Institute of Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Biochar and Soil Improvement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China

2 Institute of Economic Crops, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China

Abstract: In order to evaluate the improvement effect of biochar addition on soil physical and chemical properties, humus and humification degree, a field experiment was conducted based on biochar application. Four treatments were set up: blank control (CK), conventional fertilization (NPK), biochar application alone (B1) and biochar combined with fertilizer (NPK+B1). Through two consecutive years of field experiments, the effects of biochar addition on soil physical and chemical properties, humic acid (HA), fulvic acid (FA) and humin (HM) as well as soybean yield were studied. The

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1500604-03);辽宁省高等学校创新人才支持计划(Z20210119);辽宁省百千万人才工程(Z20210310)

收稿日期:2023-12-09; **网络出版日期:**2024-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lanyu312228@syau.edu.cn

results showed that biochar application could effectively improve soil nutrients in a short period of time, increase soil humus content, improve soil stability, improve soil texture and increase soybean yield. Compared with CK, B1 and NPK+B1 treatments had more obvious improvement effects on soil physical and chemical properties, with electrical conductivity (EC) increased by 3.50%—98.99%, organic carbon (OC) content increased by 18.01%—23.18%, alkali-hydrolyzed nitrogen (AN) content increased by 23.48%—37.15%, total nitrogen (TN) content increased by 14.93%—25.37%, available phosphorus (AP) content increased by 8.33%—110.16%, total phosphorus (TP) content increased by 10.00%—45.00%, available potassium (AK) content increased by 6.61%—20.76%, total potassium (TK) content increased by 13.24%—30.74%, and soybean yield increased by 54.34%—90.36%. Compared with NPK treatment, the contents of HA, FA and HM in NPK+B1 treatment were increased by 38.62%, 26.76% and 16.45%, respectively. And through correlation analysis and principal component analysis, it was shown that soil pH, electrical conductivity, available potassium, total potassium, total phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen, total nitrogen, organic carbon and soybean yield were significantly positively correlated with humic substances. Therefore, chemical fertilizer combined with biochar treatment can effectively improve soil physical and chemical properties, increase soil humic substance content, and provide theoretical and technical support for overcoming soybean continuous cropping obstacles and improving soybean productivity.

Key Words: biochar; meadow soil; physical and chemical properties; humic substance

大豆是我国重要的粮食和经济作物,具有丰富的营养价值和广泛的用途,并且其种植面积和产量均占全国 1/3 以上。但其产需的缺口却逐年增加,因此稳定与提高大豆的产量和品质是当前大豆生产过程中的迫切需求。在农业生产中,大豆的连作、化肥滥用和土壤养分供应不足及不平衡等问题都会导致耕地土壤板结、土壤有机质含量下降和土壤酸化、退化等问题,从而影响我国大豆的产量^[1]。

生物炭是以农林废弃物等生物质为原料,通过热解将生物质转化为富含碳的微孔材料^[2]。相比其他土壤改良剂,生物炭具有原材料便宜易得、丰富的微孔结构和较大的比表面积等特点,并且含有植物生长所必需的大量元素和中微量元素,不仅可以提高土壤的养分,更对土壤有机质和微生物活性有着显著的提升作用^[3-4]。土壤有机质含量的提高有利于改善土壤的理化性质,提高养分含量,而土壤可提取的腐殖物质(Humus extracted, HE)占土壤有机质的 50%—70%,是土壤有机质的重要组成部分。其中 Liu 等^[5]研究表明,生物炭添加改变了土壤微生物环境,促进其群落的演替,能够有效地刺激土壤腐殖物质的形成。Chen 等^[6]对水稻土的研究表明,生物炭添加显著提高了土壤 pH 值、阳离子交换量和土壤有机质含量。李昉泽等^[7]对砖红壤的研究表明,添加生物炭后砖红壤的土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量和土壤有机质含量有显著提高。李红宇等^[8]对水稻盐碱土的研究表明,生物炭施用后能够有效的增加土壤速效养分、腐殖质和有机质的含量。刘兴等^[9]对黑土和潮棕壤土的研究表明,生物炭添加对土壤理化性质和微生物产生了显著影响,与潮棕壤相比,生物炭施用后对黑土的全量养分提升较大。王莉等^[10]对大豆重茬黑土的研究表明,大豆重茬对土壤腐殖质结合形态产生了影响,重茬 3 年土壤的松结态腐殖质、稳结态腐殖质含量明显提高。而本研究以辽河平原典型的草甸土为研究对象,通过连续 2 年的田间试验,初步研究了生物炭逐年添加对大豆土壤理化性质、腐殖质组分及大豆产量的影响,进一步完善和丰富耕地土壤保护和大豆高产优质栽培技术,为生物炭和化肥合理施用及今后的深入研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地位于辽河流域下游辽中卡力玛试验基地(41°47'N, 122°71'E),处于温带湿润-半湿润季风气候,年平均日照时数 2575 h, 平均年降雨量 694 mm, 平均温度 8.1 °C。本试验研究地土壤为草甸土,其基础理化性质如表 1 所示:

表 1 试验地的土壤基础理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil foundation in the test site

土壤性质 Soil property	值 Value	单位 Units	土壤性质 Soil property	值 Value	单位 Units
pH	7.57		全磷 Total P	0.44	g/kg
电导率 Electrical conductivity	175.28	$\mu\text{S}/\text{cm}$	全钾 Total K	32.75	g/kg
碱解氮 Alkeline-N	33.83	mg/kg	全氮 Total N	0.45	g/kg
速效钾 Olsen-K	102.50	mg/kg	有机碳 Organic carbon	5.13	g/kg

1.2 试验材料

供试作物为大豆(‘铁峰 29’),供试生物炭是以玉米秸秆为原材料制备,制备方式为无氧条件下高温裂解制得,通过 500℃ 高温热解 2 小时制备而成,将制备的生物炭通过 2 mm 筛,彻底混匀。其生物炭的基础理化性质如表 2 所示:

表 2 玉米秸秆生物炭的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of corn straw biochar

生物炭性质 Biochar property	值 Value	单位 Units	生物炭性质 Biochar property	值 Value	单位 Units
pH	9.2		比表面积 Surface area	8.87	m^2/g
全氮 Total N	12.17	g/kg	孔隙度 Poresize	16.23	nm
有机碳 Organic carbon	660	g/kg	灰分 Ash content	15.57	%

1.3 田间试验设计

本试验共设置了 4 个处理,分别为①空白对照(CK)、②常规施肥(NPK)、③单施生物炭(B1)、④化肥+生物炭(NPK+B1)。试验开始于 2019 年,于每年 5 月 10 日左右播种,9 月 23 日左右收获,施肥前对土地进行人工翻耕松土,添加生物炭时与土壤 0—20 cm 土层充分混匀,大豆收获后,每个小区随机选取三点,用土钻采集 0—20 cm 土层的土壤,充分混合均匀后装入自封袋中,室内风干,分别过 20、60 和 100 目筛后进行后续的测定。

如图 1 所示,本试验在大豆成熟期进行测定,试验地每个小区长 4 m,宽 2 m,面积为 8 m^2 ,采用随机区组设计,每个处理三次重复,试验各处理施用的化肥用量为尿素 N(30 kg/hm^2)、过磷酸钙 P_2O_5 (90 kg/hm^2)、硫酸钾 K_2O (90 kg/hm^2),生物炭添加量为 3 t/hm^2 ,且为逐年添加。

1.4 分析方法

土壤中全氮(TN)利用元素分析仪(Elementer Macro Cube, 德国)测定,碱解氮(AN)的测定采用碱解扩散法,土壤中全磷(TP)的测定用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法,土壤有效磷(AP)的测定用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法(Olsen 法),土壤全钾(TK)的测定用碱熔-火焰光度法,土壤速效钾(AK)的测定用乙酸铵浸提-火焰光度法,土壤有机碳(OC)的测定用重铬酸钾容量法-外加热法测定,pH 和电导率(EC)采用电位法和电导率测试仪测定^[11]。

土壤腐殖质提取测定采用腐殖质组成修改法进行提取^[12]。分别提取出腐殖物质(HE)、富里酸(FA)、胡敏酸(HA)和胡敏素(HM)。首先用去离子水提取出水溶性物质;然后用 0.1 mol/L NaOH 与 0.1 mol/L $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ 混合液为提取剂,通过震荡、离心和过滤等步骤,从土壤中提取出可提取的 HE,再加入 1 mol/L H_2SO_4 调节 pH 1.0—1.5,(60—70 $^{\circ}\text{C}$)保温、静置过夜,过滤分离出沉淀物 HA 和溶液 FA,测定溶液



图 1 试验地点

Fig.1 Experimental location

FA 含量;HA 含量为 HE 与 FA 含量之差。测定 HE 与 FA 中有机碳含量采用 TOC 分析仪 (Analytik Jena 3100, 德国)。

1.5 数据整理与分析

试验所得数据结果采用 Excel 和 Origin 2018 等软件进行整理数据并绘制图表,利用 SPSS 17.0 软件进行数据处理系统进行方差分析和显著性检验。采用 Origin 2018 软件进行主成分 PCA 散点图分析;采用 Duncan 差异显著分析方法多重比较各种处理间差异的显著性,差异显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 生物炭配施化肥对土壤理化性质的影响

生物炭对土壤 pH 值、EC 及 OC 的变化情况如表 3 所示,土壤 Δ pH 值的变化范围为 0.13—0.20,其中 NPK+B1 处理的土壤 pH 值较 CK 处理显著增加了 4.76%和 3.43%,与 NPK 处理相比,NPK+B1 处理显著增加土壤 pH 值 4.20%和 4.12%。土壤 EC 的变化范围为 105.65—244.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$,其中 NPK+B1 处理的 EC 含量最高,为 195.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 244.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。且与 CK 处理相比,NPK+B1 处理显著增加 EC 含量 79.84%和 117.52%,与 NPK 处理相比,NPK+B1 处理显著增加 EC 含量 85.38%和 49.22%。而土壤 OC 含量范围在 5.17—6.56 g/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 OC 含量最高,为 6.29 g/kg 和 6.56 g/kg,B1 处理次之。且 NPK+B1 处理的土壤 OC 含量较 CK 处理显著增加了 19.35%和 26.89%。

表 3 生物炭施用对土壤 pH 值、电导率及有机碳的影响

Table 3 Effects of returning biochar to farmland on soil pH, electrical conductivity and organic carbon

处理 Treatment	CK		NPK		B1		NPK+B1	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
pH	7.57±0.05c	7.58±0.02bc	7.61±0.13bc	7.53±0.06c	7.87±0.02ab	7.74±0.07ab	7.93±0.10a	7.84±0.03a
电导率 EC/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	108.90±4.33b	112.36±11.05c	105.65±1.53b	163.79±6.92b	115.55±3.84b	113.45±5.92c	195.8±21.97a	244.4±11.03a
有机碳 Organic C/(g/kg)	5.27±0.12b	5.17±0.29b	5.70±0.19ab	6.02±0.10a	6.19±0.31ab	6.12±0.20a	6.29±0.41a	6.56±0.23a

CK;空白对照 Blank control;NPK;氮磷钾肥 Nitrogen phosphorus and potassium;B1;单施生物炭 Single application of biochar;NPK+B1;氮磷钾肥配施生物炭 Nitrogen phosphorus and potassium fertilizer combined with biochar;EC: 电导率 Electrical conductivity;不同小写字母表示相同年份不同处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平

从图 2 生物炭施用对土壤养分的变化情况可知,土壤 AN 含量变化为 33.60—51.33 mg/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 AN 含量最高,为 44.80 mg/kg 和 51.33 mg/kg,B1 处理次之。且 NPK+B1 处理的土壤 AN 含量较 CK 处理显著增加了 22.74%和 52.77%,与 NPK 处理相比,NPK+B1 处理显著增加土壤 AN 含量 18.93%和 49.65%。而土壤 TN 含量变化为 0.67—0.87 g/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 TN 含量最高,B1 处理次之。且 NPK+B1 处理的土壤 TN 含量较 CK 处理显著增加了 20.90%和 29.85%,与 NPK 处理相比,2020 年 NPK+B1 处理显著增加土壤 TN 含量 24.29%。

土壤 AP 含量变化为 10.23—22.50 mg/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 AP 含量最高。且与 CK 处理相比,NPK 处理显著增加土壤 AP 含量 101.17%和 97.03%,同时 NPK+B1 处理显著增加土壤 AP 含量 104.59%和 115.72%。而土壤 TP 含量变化为 0.32—0.59 g/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 TP 含量最高,为 0.56 g/kg 和 0.59 g/kg,NPK+B1 处理的土壤 TP 含量较 CK 处理显著增加了 51.35%和 84.38%。

土壤 AK 含量变化为 116.67—148.00 mg/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 AK 含量最高,为 135.00 mg/kg 和 148.00 mg/kg,B1 处理次之。且与 CK 处理相比,NPK+B1 处理显著增加土壤 AK 含量 15.71%和 25.78%,与 NPK 处理相比,2020 年 NPK+B1 处理显著增加土壤 AK 含量 18.88%。而土壤 TK 含量变化为 23.50—33.75 g/kg,其中 NPK+B1 处理的土壤 TK 含量最高,为 31.83 g/kg 和 33.75 g/kg,B1 处理次之。且 NPK+B1 处理的土壤 TK 含量较 CK 处理显著增加了 19.35%和 43.62%,与 NPK 处理相比,2020 年 NPK+B1 处理显著增加土壤 TK 含量 32.35%。由此可见,生物炭配施化肥提高了土壤的 pH 值、EC、AN、AP、AK、TN、TP、TK 和 OC 的含

量,显著提高了土壤养分。

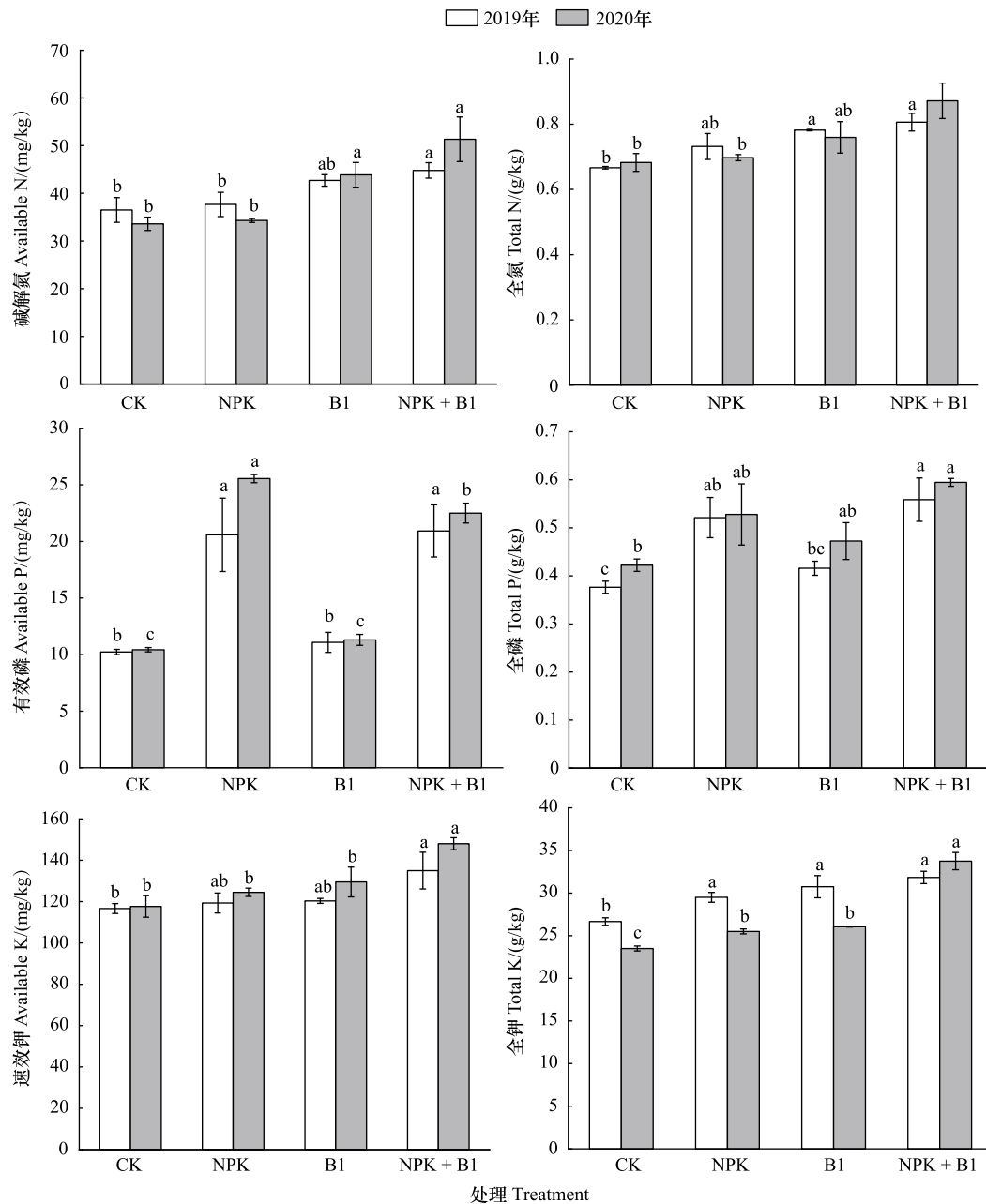


图2 2019年和2020年生物炭施用对土壤养分的影响

Fig.2 Impact of returning biochar to farmland on soil nutrients in 2019 and 2020

CK:空白对照 Blank control;NPK:氮磷钾肥 Nitrogen phosphorus and potassium;B1:单施生物炭 Single application of biochar;NPK+B1:氮磷钾肥配施生物炭 Nitrogen phosphorus and potassium fertilizer combined with biochar,不同小写字母表示相同年份不同处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平

2.2 生物炭配施化肥对土壤腐殖质组分和腐殖化程度的影响

从表4生物炭施用对土壤腐殖质组分变化情况可知,随着生物炭施用及配施化肥,各处理土壤腐殖质组分间碳含量均表现为 $HM > HA > FA$ 。土壤腐殖质组分呈增加的趋势,并且土壤腐殖质的碳含量呈现的趋势为 $NPK+B1 > B1$ 、 $NPK > CK$ 。NPK和B1处理的HA和FA含量与CK处理相比无显著差异,且 $NPK+B1$ 处理的土壤腐殖质组分显著增加,其中HA含量分别增加24.49%和45.65%;FA含量分别增加22.67%和34.33%;HM

含量分别增加 26.35% 和 27.62%。综上分析可知,生物炭施用及配施化肥均能提高土壤腐殖质 HA、FA 和 HM 的含量,但是 FA 的增幅不如 HA 含量明显。

表 4 2019 年和 2020 年各处理土壤的腐殖质组分含量

Table 4 Content of humus components in soils treated in 2019 and 2020

处理 Treatment	胡敏酸 Humic acid/ (g/kg)		富里酸 Fulvic acid/ (g/kg)		胡敏素 Humin/ (g/kg)	
	2019 年	2020 年	2019 年	2020 年	2019 年	2020 年
CK	0.98±0.09b	1.38±0.01b	0.75±0.02b	0.67±0.03b	3.53±0.19b	2.86±0.11b
NPK	1.13±0.03ab	1.45±0.07ab	0.74±0.03b	0.71±0.06ab	3.83±0.21ab	3.87±0.16a
B1	1.10±0.07ab	1.80±0.34ab	0.84±0.05ab	0.80±0.02ab	4.25±0.24a	3.52±0.16ab
NPK+B1	1.22±0.04a	2.01±0.06a	0.92±0.05a	0.90±0.10a	4.46±0.16a	3.65±0.35a

从图 3 中可以看出,NPK、B1 和 NPK+B1 处理的 HA/FA 和 HA/HE 值含量较 CK 处理相比有所增加,其中虽然 2019 年 B1 和 NPK+B1 的 HA/HE 值有所增加,但 HA/FA 和 HA/HE 值变化无显著差异。相比于 CK 处理,2020 年 NPK、B1 和 NPK+B1 处理显著增加了 HA/HE 值含量,从 17.54% 增加到 21.05%,B1 处理显著增加 HA/FA 含量 27.18%。总体来说,生物炭施用及配施化肥提高了土壤腐殖质腐殖化的活性,HA/FA 和 HA/HE 值含量增加趋势明显,说明生物炭施用及配施化肥到土壤中 HA 的增加幅度大于 FA,FA 受到了抑制。

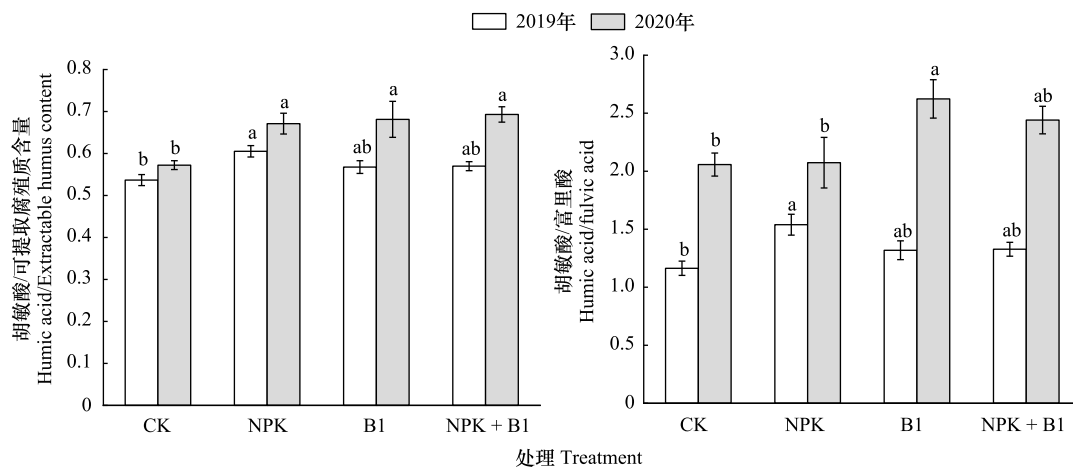


图 3 2019 年和 2020 年各处理土壤的腐殖化程度

Fig.3 The degree of soil humification in each treatment in 2019 and 2020

2.3 生物炭配施化肥对大豆产量的影响

从图 4 生物炭施用对大豆产量的变化情况可知,大豆产量变化为 1374.88—2678.92 kg/ha,其中 NPK+B1 处理的大豆产量最高,为 2678.92 kg/ha,B1 处理次之,为 2072.71 kg/ha。且与 CK 处理相比,2019 年 NPK、B1 和 NPK+B1 处理的大豆产量显著增加了 40.07%、46.91% 和 99.67%,与 NPK 处理相比,NPK+B1 处理的大豆产量显著增加了 42.55%。2020 年 NPK+B1 处理的大豆产量较 CK 处理显著增加了 90.36%。综上所述,生物炭施用及配施化肥能够大幅增加大豆作物产量。

2.4 土壤理化特性与腐殖质组分的关系

对土壤理化特性与腐殖质组分分别进行相关性分析(图 5)和主成分分析(图 6)表明,pH 值与土壤 AK、TK、AN、TN 和 HA 呈显著正相关关系。EC 与土壤 AK、TK、AP、TP、AN、TN、FA、HA 和大豆产量呈显著正相关关系。AK 与土壤 TK、TP、AN、TN、OC、HA、FA 和大豆产量呈显著正相关关系。AP 与 TP 呈显著正相关关系。TP 与土壤 OC、HA、HM 和大豆产量呈显著正相关关系。AN 与土壤 TN、FA、HA 和大豆产量呈显著正相关关系。TN 与土壤 FA、HA、HM、OC 和大豆产量呈显著正相关关系。OC 与土壤 FA、HA、HM 和大豆产量呈显著

正相关关系。FA 与土壤 HA 和大豆产量呈显著正相关关系。HM 与大豆产量呈显著正相关关系。

3 讨论

3.1 生物炭逐年施用对大豆土壤理化性质及产量的影响

土壤养分是影响土壤肥力的重要指标,含有作物生长所必需的营养元素。而生物炭的应用已被证明可以显著改善土壤的理化性质^[13]。试验结果表明,随着种植年限的增加各处理土壤 pH 值含量均有所下降,这与杨劲峰等^[14]研究一致。此外,与 CK 处理相比,B1 和 NPK+B1 处理提高了土壤 pH 值含量,这与樊洪等^[15]研究一致,可能是因为生物炭表面存在负电荷的酚类、羧基和羟基,可以与土壤溶液结合,从而提高土壤 pH 值。

土壤电导率(EC)是一种测量土壤盐含量的方法,是养分可用性、利用效率、土壤质地和有效水容量的良好指标。NPK、B1 和 NPK+B1 处理提高了土壤 EC 值,这可能是由于生物炭及化肥中的阳基离子(K、Ca、Mg 等)被释放溶解到土壤水分中,从而导致土壤盐分增加。Chintala 等^[16]研究表明,玉米秸秆生物炭可以显著增加土壤溶液中的 EC,这与本研究结果基本一致。

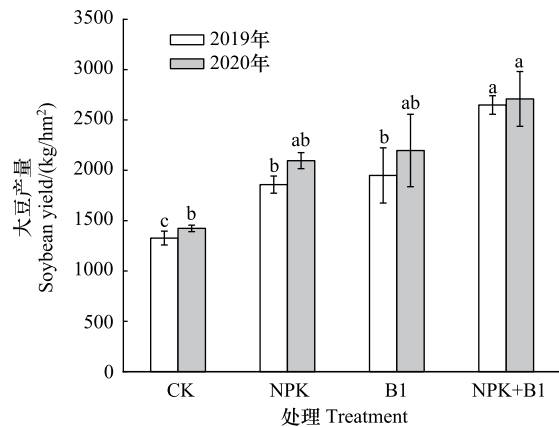
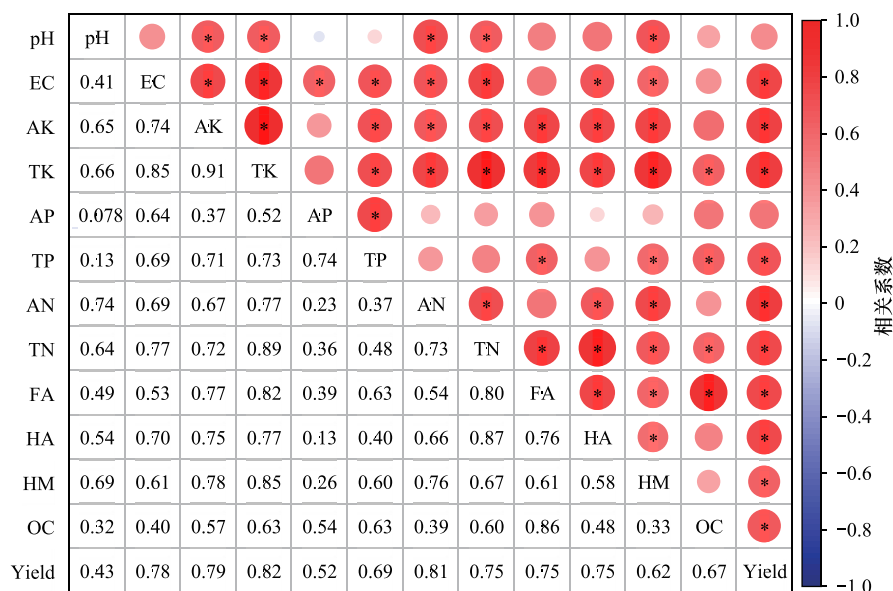


图4 2019 年和 2020 年生物炭施用对大豆产量的影响

Fig.4 The impact of biochar return on soybean yield in 2019 and 2020



* $P \leq 0.05$

图5 腐殖质与土壤养分及产量的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between humus and soil nutrients and yield

EC: 电导率 Electrical conductivity; AK: 速效钾 Available K; TK: 全钾 Total K; AP: 有效磷 Available P; TP: 全磷 Total P; AN: 碱解氮 Available N; TN: 全氮 Total N; FA: 富里酸 Fulvic acid; HA: 胡敏酸 Humic acid; HM: 胡敏素 Humin; OC: 有机碳 Organic carbon; Yield: 大豆产量 Soybean yield

土壤有机碳是土壤的核心部分,本研究中,随着种植年限的增加 B1 处理的土壤 OC 含量有所下降,可能是因为生物炭中还含有一些不稳定或易被微生物等分解的 C,被浸出丢失。而与 CK 处理相比 2020 年 NPK、B1 和 NPK+B1 处理显著增加了土壤 OC 含量,这与他人的研究结果^[17-22]相似,原因可能是因为生物炭本身

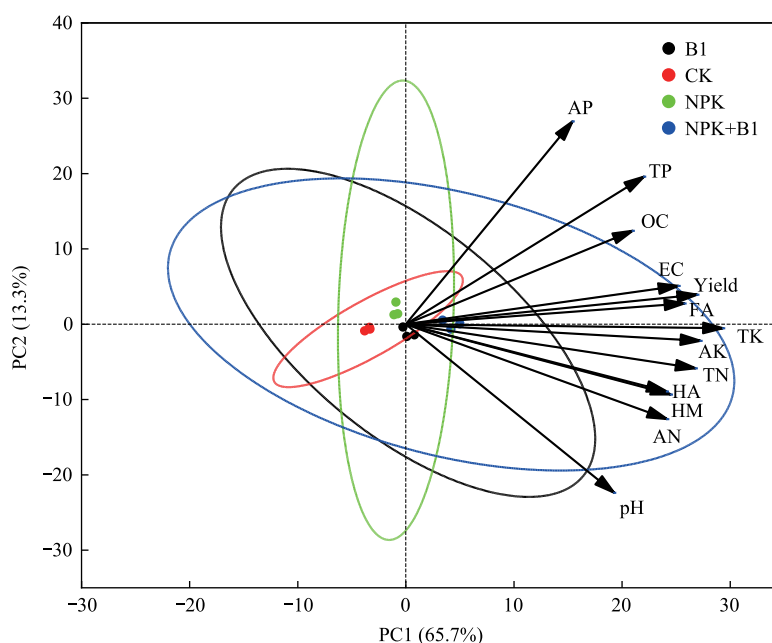


图6 主成分分析散点图

Fig.6 Scatter plot of principal component analysis

含有较高的碳含量,不易被矿化分解;并且含有大量的芳香族有机化合物,与其他物质相比很难被微生物降解。

研究发现,与CK处理相比,NPK+B1处理显著提高了土壤AN、TN、AP、TP、AK和TK的含量。这可能是由于生物炭和化肥的应用提高了土壤养分的有效性,且秸秆制成的生物炭含有游离的营养阳离子与土壤之间发生相互作用和反应,如溶解和沉淀、吸附和解吸以及氧化还原反应等,增强了对土壤养分的吸附能力,减少了养分的损失。Cao等^[23]研究表明,生物炭的添加提高了土壤pH值、EC、TC和TP含量,不仅改善了土壤性质,而且有利于提高土壤生物磷;孔祥清等^[24]研究表明,生物炭增加了盐碱地的TN、TP、TK和土壤有机质含量,生物炭处理的大豆产量最高,是CK的2.22倍;符小文等^[25]研究发现,施加化肥处理条件下会提高大豆植株干物质及各器官氮素的积累量。而B1处理的AP和TP含量与CK相比不显著可能是由于生物炭具有较大的孔隙度,会使土壤含水量增加,土壤氧化还原电位(Eh)降低,降低了磷的活性。NPK和B1处理的速效钾含量与CK相比不显著可能是因为生物炭和化肥的施用促进了土壤中矿物质钾的活化,这与潘占东等^[26]研究结果一致;而李红宇等^[8]研究表明,单施生物炭处理除TK外,土壤TN、TP、AP和AK含量均显著增加,这与本研究基本一致。总体来说,生物炭配施化肥逐年施用提高了大豆土壤的养分含量,主要是生物炭因其特殊的理化性质,能够产生正、负电荷,有效地吸附土壤中的养分,增加土壤有机质,降低淋溶损失,提高土壤养分效率。

试验结果表明,与CK处理相比,生物炭施用大幅度提高了大豆的产量,且NPK+B1处理大豆产量增幅最大,提高了94.85%。这可能是由于生物炭的添加改善了土壤的物理结构和微生物活性,其较高的孔隙率提高了土壤中的水分和有机质含量,促进了大豆根系生长发育,同时,添加生物炭也改善了土壤微生物活性,微生物的大量繁殖间接地提高了土壤养分条件,提高了产量。黄连喜等^[27]研究发现,生物炭能够改善土壤结构,促进大豆的根系向下生长。且侯伟男等^[28]也发现,生物炭对大豆生长发育有着促进的作用,提高了大豆地上部分的株高、鲜重及干重;地下部分的根瘤数、根瘤鲜重及干重,对大豆产量有明显的促进作用。

3.2 生物炭逐年施用对大豆土壤腐殖质组分的影响

生物炭逐年施用可以增强土壤微生物新陈代谢、刺激残留物和腐殖物质的分解,从而合成一种有机高分

子化合物,并促进腐殖质形成。而生物炭添加也能改变土壤腐殖质组分的含量,其组分的积累和分解会进一步影响土壤肥力^[29]。FA、HA 和 HM 含量在 NPK+B1 处理时显著高于 CK,并且 NPK 和 B1 处理与 CK 相比也明显有所增加,这一结果说明生物炭配施化肥有助于土壤腐殖质组分改善,且生物炭配施化肥方式对土壤腐殖质累积效果较好。该结果与孟凡荣等^[30]的研究结果相似,可能是由于生物炭添加后被土壤微生物矿化分解,促进了土壤腐殖质的形成。而关松等^[31]研究表明,施肥措施提高了农田土壤肥力,但对土壤 HA 数量影响不显著。

而在不同的形成条件下土壤腐殖质的腐殖化和分子复杂程度可以用腐殖质活性指标胡敏酸/富里酸(HA/FA)或 PQ 值来作为衡量指标,通过 HA 和 FA 的比值及 HA 在腐殖酸中所占的比例来确定土壤腐殖化过程的优劣^[32]。与 CK 处理相比,NPK+B1 处理的 HA/FA 明显提高,可能是因为相较于 HA,FA 分子量更小,易被生物炭吸附,而 2020 年与 CK 处理相比,其他处理显著增加了 PQ 值,并且 2020 年相较 2019 年明显提高了土壤 HA/FA,可能是由于 2020 年土壤拥有其上一年的大豆生长发育过程中的残留物和腐殖物质,而生物炭及化肥的施用,使腐殖质各组分增加,腐殖质得到更新和补充,土壤活性增强,这与他人的研究结果^[33]相似。

4 结论

本研究以东北辽河平原常见的草甸土为研究对象,通过连续 2 年的田间试验,对土壤理化性质、腐殖质组分、腐殖化程度及大豆产量进行了测定分析。试验发现,与 CK 处理相比,NPK+B1 处理显著提高了土壤 pH 值、EC、OC、NPK 速效养分、NPK 全量养分、腐殖质组分(FA、HA、HM)和大豆产量,并明显提高了土壤腐殖化程度(HA/HE、HA/FA),且与 NPK 处理相比,2020 年 NPK+B1 处理显著提高了土壤 pH、EC、AN、TN、AK、TK。由此可见,生物炭配施化肥处理对土壤理化性质、腐殖质组分及其大豆产量具有持续性影响,并能够提高土壤腐殖质的稳定性,但具有时效性。通过相关性和主成分分析表明,pH、AK、TK、AN、TN、OC 和大豆产量与土壤腐殖质组分呈显著正相关关系。综上所述,生物炭配施化肥处理可以提升土壤的养分和腐殖化程度,并提高大豆的产量,为土壤养分失调和供应等方面发挥了可持续的作用,为大豆连作土壤的可持续发展提供参考。

参考文献(References):

- [1] 蒋龙刚,史建硕,郭丽,任燕利,潘丽佳,王丽英.不同氮磷钾水平对夏大豆产量与品质的影响.大豆科学,2023,42(2):220-227.
- [2] Chen W F, Meng J, Han X R, Lan Y, Zhang W M. Past, present, and future of biochar. Biochar, 2019, 1(1): 75-87.
- [3] Sheng Y Q, Zhu L Z. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. The Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 1391-1399.
- [4] Weber K, Quicker P. Properties of biochar. Fuel, 2018, 217: 240-261.
- [5] Liu Q M, He X Y, Wang K L, Li D J. Biochar drives humus formation during composting by regulating the specialized metabolic features of microbiome. Chemical Engineering Journal, 2023, 458: 141380.
- [6] Chen L, Guo L, Ali A, Zhou Q C, Liu M J, Zhan S W, Pan X H, Zeng Y J. Effect of biochar on the form transformation of heavy metals in paddy soil under different water regimes. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(3): 387-398.
- [7] 李昉泽,詹剑.木薯渣和甘蔗渣基生物炭对砖红壤的改良效果.热带生物学报,2023,14(5):577-584.
- [8] 李红宇,林添,王志君,赵海成,郑桂萍,吕艳东,钱永德,范名宇.生物炭连续还田后效对盐碱土稻田养分、酶活性和腐殖质组分的影响.干旱地区农业研究,2022,40(4):135-142.
- [9] 刘兴,武国慧,张玉兰,解宏图,陈振华,陈利军.生物炭施用方式对黑土和潮棕壤养分及氮磷转化相关酶活性的影响.应用生态学报,2021,32(8):2693-2702.
- [10] 王莉,吴景贵,张志莹,杨天悦.大豆重茬对黑土团聚体及腐殖质结合形态的影响.水土保持学报,2014,28(2):238-242.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版).北京:中国农业出版社,2005.
- [12] 窦森.土壤有机质.北京:科学出版社,2010.
- [13] Yin D W, Li H Y, Wang H Z, Guo X H, Wang Z H, Lv Y D, Ding G H, Jin L, Lan Y. Impact of different biochars on microbial community structure in the rhizospheric soil of rice grown in albic soil. Molecules, 2021, 26(16): 4783.
- [14] 杨劲峰,江彤,韩晓日,李丹,张春芳,王月,黄玉茜.连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响.中国土壤与肥料,2015(3):

68-73.

- [15] 樊洪, 谢珊, 龙天雨, 杨丽, 段淳, 刘元生, 宋理洪, 陈祖拥. 刺梨果渣生物炭对白菜产量及品质和土壤性质的影响. 环境科学, 2023(3): 1-12.
- [16] Chintala R, Mollinedo J, Schumacher T E, Malo D D, Julson J L. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(3): 393-404.
- [17] Yang X, Wang D, Lan Y, Meng J, Jiang L L, Sun Q, Cao D Y, Sun Y Y, Chen W F. Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(4): 1569-1578.
- [18] Wang Q Y, Yuan J, Yang X, Han X R, Lan Y, Cao D Y, Sun Q, Cui X, Meng J, Chen W F. Responses of soil respiration and C sequestration efficiency to biochar amendment in maize field of Northeast China. Soil and Tillage Research, 2022, 223.
- [19] 李毅, 梁嘉平, 王小芳, 杨哲, 樊向阳. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物炭施用量. 土壤学报, 2023(6): 1-12.
- [20] 邹瑞晗, 王振华, 朱艳, 宗睿, 陈睿. 非灌溉季节生物炭施用对滴灌棉田土壤团聚体及其碳含量的影响. 土壤通报, 2023, 54(3): 626-635.
- [21] 庞津雯, 王钰皓, 陶宏扬, 卫婷, 高飞, 刘恩科, 贾志宽, 张鹏. 生物炭不同添加量对旱作覆膜农田土壤团聚体特性及有机碳含量的影响. 中国农业科学, 2023, 56(9): 1729-1743.
- [22] Zhao S X, Yu X L, Li Z H, Yang Y, Liu D, Wang X D, Zhang A F. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: influence on the soil active organic carbon. Huan Jing Ke Xue = Huanjing Kexue, 2017, 38(1): 333-342.
- [23] Cao D Y, Lan Y, Chen W F, Yang X, Wang D, Ge S H, Yang J X, Wang Q Y. Successive applications of fertilizers blended with biochar in the soil improve the availability of phosphorus and productivity of maize (*Zea mays* L.). European Journal of Agronomy, 2021, 130: 126344.
- [24] 孔祥清, 韦建明, 常国伟, 宋佳, 吕艳东, 王智慧, 殷大伟, 李红宇. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响. 大豆科学, 2018, 37(4): 647-651.
- [25] 符小文, 张永杰, 杜孝敬, 匡润祥, 安崇霄, 房彦飞, 徐文修, 张娜. 麦-豆轮作体系周年施氮量对夏大豆氮素利用效率和产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 453-460.
- [26] 潘占东, 马倩倩, 陈晓龙, 蔡立群, 蔡雪梅, 董博, 武均, 张仁陟. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤养分、腐殖质及其组分的影响. 草业学报, 2022, 31(2): 14-24.
- [27] 黄连喜, 魏岚, 李衍亮, 黄玉芬, Nyo Nyo Mar, 许桂芝, 黄庆, 刘忠珍. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究. 中国土壤与肥料, 2018(1): 101-107.
- [28] 侯伟男, 刘靖愉, 邢一唱, 刘泽华, 臧永奎, 袁梅, 高宇, 史树森. 生物炭施入量对大豆生长发育及产量的影响. 中国农学通报, 2021, 37(15): 14-19.
- [29] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响. 环境科学, 2017, 38(2): 769-782.
- [30] 孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 张葛, 钟双玲. 施用玉米秸秆生物炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 122-128.
- [31] 关松, 窦森, 马丽娜, 温晓辉, 周鑫, 刘金华, 王研, 徐雅婧. 长施马粪对暗棕壤团聚体腐殖质数量和质量的影响. 土壤学报, 2017, 54(5): 1195-1205.
- [32] 张艳鸿, 窦森, 董珊珊, 谭岑, 李立波, 林琛茗. 秸秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响. 土壤学报, 2016, 53(3): 694-702.
- [33] 周明星, 樊军, 王茜, 代子俊, 苟国花. 免耕覆盖与生物炭对黑垆土团聚体稳定性和腐殖质性质的影响. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 848-859.