

碳氮添加对雨养农田土壤物理性状的影响

江晶^{1,2,3}, 武均^{1,2}, 张仁陟^{1,2,4}, 蔡立群^{1,2,4}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070; 4. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘要: 为探明添加不同碳源及不同量氮肥 4 年后对土壤物理性质、产量的影响, 依托布设于甘肃省定西市安定区李家堡镇的不同碳源田间定位试验, 设置 2 种碳源(生物质炭 15 t/hm², 秸秆 4.5 t/hm²), 3 个氮肥施用量(0, 50, 100 kg/hm²), 共计 9 个处理。研究了生物质炭、秸秆配施氮肥对试区土壤容重、总孔隙度、土壤饱和导水率、土壤团聚体稳定性、产量的影响。结果表明: 较之无碳添加处理, 添加生物质炭或秸秆均可改善土壤物理性质, 但生物质炭效果最好。秸秆输入对 0—5 cm 土层土壤容重的降低和总孔隙度、水稳性团聚体稳定性的提升具有显著效应, 对土壤饱和导水率和 0—30 cm 各土层机械稳定性团聚体稳定性的提升具有显著效应, 而生物质炭对 0—30 cm 各土层的土壤物理指标的改善均具有显著效应。氮素添加对土壤物理指标影响较小。生物质炭、秸秆、氮素均可促进作物增产, 总体而言, 生物质炭增产效果优于秸秆, 尤其是生物质炭 15 t/hm² + 施纯氮 100 kg/hm² 处理。因此, 添加生物质炭更有利于该区土壤物理性质的改善和产量的增加。

关键词: 生物质炭; 秸秆; 氮素; 物理性状; 产量

中图分类号: S145.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0234-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.037

Effect of Carbon and Nitrogen Addition on Soil Physical Properties in Rainfed Farmland

JIANG Jing^{1,2,3}, WU Jun^{1,2}, ZHANG Renzhi^{1,2,4}, CAI Liqun^{1,2,4}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu

Agricultural University, Lanzhou 730070; 3. College of Management, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070, China; 4. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Lanzhou 730070)

Abstract: A 4-year field trial was conducted at the Rained Agricultural Experimental Station of Gansu Agricultural University in the Loess Plateau of central Gansu Province. Experimental treatments of carbon (C) addition sources included straw, biochar and no C addition, and each C treatment was combined with three nitrogen (N) addition levels, 0, 50 and 100 kg/hm² respectively. The experimental set-up was a randomized complete block design with three replications. The aim of the study was to determine the effect of different C sources and different N levels on soil bulk density, total porosity, soil saturated hydraulic conductivity, soil aggregate stability and crop yield. The soils were sampled at three layers (0—5, 5—10 and 10—30 cm) per plot. The results showed that compared with no C addition treatments, application of biochar or straw increased soil total porosity, reduce bulk density, especially biochar addition, it had significant effects on reducing bulk density and increasing soil total porosity at all three observed depths, the effects of straw addition, however, was observed at 0—5 cm layer. Both straw and biochar could significantly improve soil saturated hydraulic conductivity, but the effect of biochar addition was greater than that of straw addition plots. Among observed layers, in comparison with no C addition plots, both biochar addition and straw addition could enhance the amount of soil mechanical stable aggregates and MWD significantly, and the effect of biochar addition was greater than that of straw. The amount of soil water stable aggregates and MWD were increased more significantly in biochar addition soils than those in no C addition and straw addition treatments.

收稿日期: 2018-08-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(31571594, 41661049); 甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA076)

第一作者: 江晶(1982—), 女, 甘肃兰州人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 18693123776@163.com

通信作者: 张仁陟(1961—), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作、节水农业及土壤生态教学与研究。E-mail: zhan-grz@gsau.edu.cn

Hence, both biochar and straw treated soils improved soil physical properties, and biochar showed the greatest effects. The effects of biochar, straw and nitrogen on crop yield were significant, but biochar was the best, especially biochar 15 t/hm² + nitrogen 100 kg/hm². As a whole, biochar addition was proposed for the sustainable agricultural development in the Loess Plateau of central Gansu Province.

Keywords: biochar; straw; nitrogen; soil physical properties; crop yield

陇中黄土高原半干旱区因受其地形地貌、气候因素、土壤结构等因素的影响,已成为我国乃至世界水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一^[1]。当地为雨养农业,土壤肥力整体低下,施用氮肥是其农业增产的重要环节。关于氮肥用量对土壤化学指标及产量的影响研究已有很多^[2],但不同氮肥施入量对土壤物理性质影响的研究报道却很少。此外,当地传统的生产方式是在作物收获后将秸秆移出农田,这不仅破坏农田土壤结构稳定性,加剧土壤碳矿化,还提升了农田水土、养分流失的可能性^[1,3]。实践证明^[4]秸秆还田对生态及农田肥力的提高有积极作用。而以作物秸秆为主要原料,在完全或部分缺氧的条件下通过热裂解、碳化而生成的一种高度芳香化、难溶性的固态物质——生物质炭^[5],成为近年来新的改善生态环境、提高土壤肥力的研究热点。已有研究^[6]表明添加秸秆可以提高土壤团粒结构稳定性,降低土壤容重并有效地改善土壤结构。很多国内外学者^[3,7-10]对生物质炭在农田土壤物理性质改善,增加土壤碳汇、减少温室气体排放以及增产等方面开展了大量研究,但目前所得结论并不一致。Biswas 等^[11]、Liu 等^[12]研究表明施入生物质炭可提高土壤水稳性团聚体含量,提升团聚体稳定性;而也有研究^[13]指出施用生物质炭对土壤水稳性团聚体含量与稳定性并无显著影响。陈红霞等^[9]通过施用生物质炭 3 年后发现,生物质炭仅可显著降低表层(0—7.5 cm)土壤容重;也有研究^[10]表明生物质炭可降低 0—10 cm 土层土壤容重。Oguntunde 等^[14]的研究也表明,生物质炭的施入可以提高土壤总孔隙度,并使土壤持水能力增强,但如果施入生物质炭过量,则可能会堵塞土壤孔隙,影响土壤水分的渗透率。目前,对于秸秆和生物质炭对土壤物理性状作用的比较试验鲜见报道,且关于陇中黄土高原旱作农田秸秆或生物质炭配施氮肥对土壤物理性质及农田生产力的综合报道更少。因此,为探明秸秆、生物质炭配施氮肥 4 年后对土壤物理性质和作物产量的影响,本研究依托于甘肃农业大学自 2014 年布设于定西市安定区李家堡镇麻子川村的不同碳源配施氮肥定位试验,对试区 2017 年收获后土壤容重、总孔隙度、团聚体含量、稳定性以及 2015—2016 年产量进行测定、分析,旨在探索适合于该区农业可持续发展的最佳方式,并为相关研究提供

可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设于黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市李家堡镇甘肃农业大学旱农试验站。试区属中温带半干旱区,平均海拔 2 000 m,无霜期 140 d,年均日照时间 2 476.6 h,年均太阳辐射 594.7 KJ/cm²,年均气温 6.4 °C,≥0 °C 积温 2 933.5 °C,≥10 °C 积温 2 239.1 °C;多年平均降水量 390.9 mm,年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,80% 保证率的降水量为 365 mm,变异系数为 24.3%,为典型的雨养农业区。农田土壤为典型的黄绵土,土层深厚,土质绵软,质地均匀,有良好的渗透性和可耕性,而土壤肥力水平及有机物质含量低,易受侵蚀。试区土壤基本理化性质:pH 8.45,有机碳 8.32 g/kg,全氮 0.86 g/kg,全磷 0.82 g/kg,全钾 28.00 g/kg,碱解氮 51.10 mg/kg,速效磷 21.19 mg/kg,速效钾 100.90 mg/kg,0—200 cm 平均土壤容重 1.17 g/cm³。

1.2 试验设计

试验涉及碳、氮 2 个因素,碳素设置为不施碳(No carbon)、施用秸秆(Straw)、施用生物质炭(Biochar);氮素设置为不施氮、施纯氮 50 kg/hm²、施纯氮 100 kg/hm² 3 个水平。试验共设 9 个处理(表 1)。所有处理均采用随机区组排列,各处理 3 个重复,共计 27 个小区,小区面积 3 m×6 m=18 m²。

其中,生物质炭于 2014 年 3 月上旬一次性施入 15 t/hm²,利用旋耕机将其翻埋入土壤(耕深(18±2) cm)。秸秆于每年收获后利用铡草机切割为 3~5 cm 长小段均匀散布于还田小区内,并利用旋耕机将其翻埋入土壤(三耕两耩,耕深(18±2) cm)。各处理于每年播种前均施入 P₂O₅ 105 kg/hm²(过磷酸钙,P₂O₅ 含量为 14%);试验中所添加氮素为尿素(纯氮含量为 46%),于每年播种前根据各处理所需用量同磷肥一并均匀撒施于各小区后,迅速利用播种机播种(播深(7±2) cm),待肥料与土壤混合,利用耩耩将地耩平。

供试作物为定西 40 号春小麦(*Triticum turgidum* L.),自 2014 年开始,采用春小麦连作并遵循定西当地传统耕作生产方式,于每年 3 月下旬播种,播量为 187.5 kg/hm²,行距 20 cm,7 月下旬收获,收获后三耕两耩。

供试生物质炭来源于金和福农业科技股份有限公司生产的生物质炭,碳含量 53.28%,氮素含量 1.04%;小麦秸秆含碳量 38.49%,氮素含量为 0.55%。

表 1 处理描述

处理代码	处理描述
CN0	无碳+不施氮
CN50	无碳+施纯氮 50 kg·hm ⁻²
CN100	无碳+施纯氮 100 kg·hm ⁻²
BN0	生物质炭 15 t·hm ⁻² +施纯氮 0 kg·hm ⁻²
BN50	生物质炭 15 t·hm ⁻² +施纯氮 50 kg·hm ⁻²
BN100	生物质炭 15 t·hm ⁻² +施纯氮 100 kg·hm ⁻²
SN0	秸秆 4.5 t·hm ⁻² +不施氮
SN50	秸秆 4.5 t·hm ⁻² +施纯氮 50 kg·hm ⁻²
SN100	秸秆 4.5 t·hm ⁻² +施纯氮 100 kg·hm ⁻²

1.3 采样与测定

于 2017 年 7 月收获后按照“S”形采样法采集各小区 0—5, 5—10, 10—30 cm 各土层供试土样 2 000 g 左右,其中 1 000 g 装于硬质塑料保鲜盒带回实验室自然风干后用于土壤团聚体分析;500 g 装于塑料自封袋带回实验室自然风干后过 2 mm 筛用于土壤化学性质分析;500 g 装于塑料自封袋带回实验室储存于 4 ℃ 冰柜,用于生物指标测定。

土壤容重和总孔隙度采用环刀法测定^[15];土壤饱和导水率采用圆盘渗透仪法测定^[16];土壤团聚体采用干筛法和约得尔湿筛法^[15]得到 $\geq 5, 2\sim 5, 0.25\sim 2, < 0.25$ mm 4 个粒级团聚体含量后利用 ≥ 0.25 mm 团聚体含量和平均重量直径 MWD(mm)表征团聚体稳定性^[17]。

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i \cdot w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中: R_i 是某级别团聚体平均直径(mm); w_i 是该级

别团聚体干重(kg)。

收获后单打单收统计产量,由于 2017 年 6 月 20 日和 7 月 14 日定西市李家堡镇遭遇特大冰雹灾害,严重影响小麦生长,导致无产,因此文中选用 2015 年和 2016 年 2 年产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 软件制作图表,利用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,多重比较采用新负极大差法。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和总孔隙度

土壤容重和总孔隙度是衡量土壤紧实度的指标。由表 2 可知,各处理容重均随土层加深而增高,总孔隙度反之。不同氮素添加水平下均以生物质炭添加处理的容重最低,秸秆添加处理次之,无碳添加处理的最高,总孔隙度反之;而在不同碳源添加下,土壤容重、总孔隙度并未随氮素添加水平变化而产生显著差异。在 0—5, 5—10, 10—30 cm 3 个土层,生物质炭添加处理(BN0、BN50、BN100)土壤容重均值分别低于秸秆添加处理(SN0、SN50、SN100)相对应土层的 5.24%, 4.73%, 4.59%, 其总孔隙度分别高于秸秆添加处理相对应土层的 4.15%, 3.81%, 4.25%;生物质炭添加处理土壤容重均值分别低于无碳添加处理(CN0、CN50、CN100)相对应土层的 8.33%, 8.66%, 6.18%, 其总孔隙度分别高于无碳添加处理相对应土层的 7.01%, 7.56%, 5.96%。在 0—30 cm 各土层,生物质炭对土壤容重以及土壤总孔隙度的效应均在 $P \leq 1\%$ 水平达到显著,而添加秸秆仅在 0—10 cm 土层有显著效应。

表 2 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤容重和总孔隙度的影响

处理	容重/(g·cm ⁻³)			总孔隙度/%		
	0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm	0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm
CN0	1.21a	1.26b	1.29a	54.49c	52.53d	51.22d
BN0	1.12c	1.12e	1.23c	57.77a	57.55a	53.50b
SN0	1.18ab	1.18d	1.28ab	55.63bc	55.59b	51.75cd
CN50	1.20a	1.23c	1.30a	54.54c	53.71c	51.12d
BN50	1.11c	1.13e	1.22c	58.10a	57.42a	53.79b
SN50	1.17b	1.19cd	1.27b	55.82b	55.20bc	52.13c
CN100	1.22a	1.22c	1.30a	53.85c	54.02c	51.10d
BN100	1.10c	1.13e	1.19d	58.43a	57.39a	55.21a
SN100	1.17b	1.19cd	1.27b	55.90b	55.24bc	52.01c
N	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s
生物质炭	38.48***	49.68***	17.95***	38.48***	49.68***	17.95***
秸秆	5.90*	11.30**	n. s	5.90*	11.30**	n. s
N×生物质炭	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s
N×秸秆	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s	n. s

注:同列不同小写字母代表统计检验在 $P \leq 5\%$ 水平差异显著;N 为氮素;ns 表示该因子在 $P \leq 5\%$ 水平下无显著效应;* 表示该因子在 $P \leq 5\%$ 水平下有显著效应;** 表示该因子在 $P \leq 1\%$ 水平下有显著效应;*** 表示该因子在 $P \leq 0.1\%$ 水平下有显著效应;*, **, *** 前的数值为 F 值。下同。

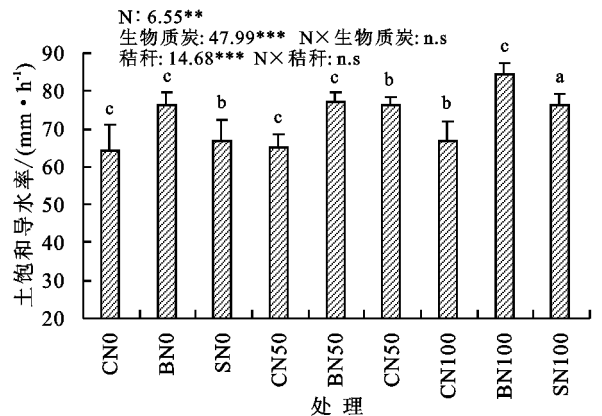
2.2 土壤饱和和导水率

由图 1 可知,有机物料添加处理下,不同氮素添加水平间的土壤饱和和导水率差异显著,而无碳添加各处理间的差异不显著;在相同氮素水平下,生物质炭添加各处理的土壤饱和和导水率均高于秸秆添加处理的,其中 BN100 处理的土壤饱和和导水率最高,且显著高于其他处理($P \leq 5\%$)。在 N0、N50、N100 3 个氮素添加水平下,生物质炭添加各处理分别高于秸秆添加和无碳添加相对氮素添加水平各处理的 14.03%, 1.20%, 11.01% 和 18.51%, 18.74%, 26.49%。氮素、生物质炭和秸秆对土壤饱和和导水率的效应分别在 $P \leq 1\%$, $P \leq 0.1\%$ 和 $P \leq 0.1\%$ 水平达到显著,且生物质炭的效应最高。

2.3 土壤机械稳定性团聚体

2.3.1 团聚体组成 由图 2 可知,不同处理下 ≥ 5 , 2~5, 0.25~2 mm 3 个粒级机械稳定性团聚体均随土层加深而降低,而 < 0.25 mm 非机械稳定性团聚体则反之。N100 处理(CN100、BN100、SN100 3 个处理的均值)下的各粒级机械稳定性团聚体含量最高, N0 处理(CN0、BN0、SN0 3 个处理的均值)的最低;非机械稳定性团聚体则以 N0 处理最高, N100 处理最低。在 0—30 cm 各土层, CN0、CN50、CN100 3 个处理的各粒级土壤颗粒含量均随粒级变小而增加。在 0—5 cm 土层, BN0、BN50、BN100 3 个处理的各粒级土壤颗粒含量按其

高低排序为: (0.25~2 mm) > (2~5 mm) > (≥ 5 mm) > (< 0.25 mm); 在 5—10 cm 土层, 3 个生物质炭添加处理的各粒级土壤颗粒含量按其高低排序为: (0.25~2 mm) > (< 0.25 mm) > (2~5 mm) > (≥ 5 mm); 而在 10—30 cm 土层则与无碳源添加处理一致。在 0—5 cm 土层, SN0、SN50、SN100 3 个处理的各粒级土壤颗粒含量按其高低排序为: (0.25~2 mm) > (< 0.25 mm) > (2~5 mm) > (≥ 5 mm); 而在 5—30 cm 各土层则与无碳源添加处理一致。



注:不同小写字母代表统计检验在 $P \leq 5\%$ 水平差异显著; ns 表示该因子在 $P \leq 5\%$ 水平下无显著效应; * 表示该因子在 $P \leq 5\%$ 水平下有显著效应; ** 表示该因子在 $P \leq 1\%$ 水平下有显著效应; *** 表示该因子在 $P \leq 0.1\%$ 水平下有显著效应; *, **, *** 前的数值为 F 值。下同。

图 1 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤饱和和导水率的影响

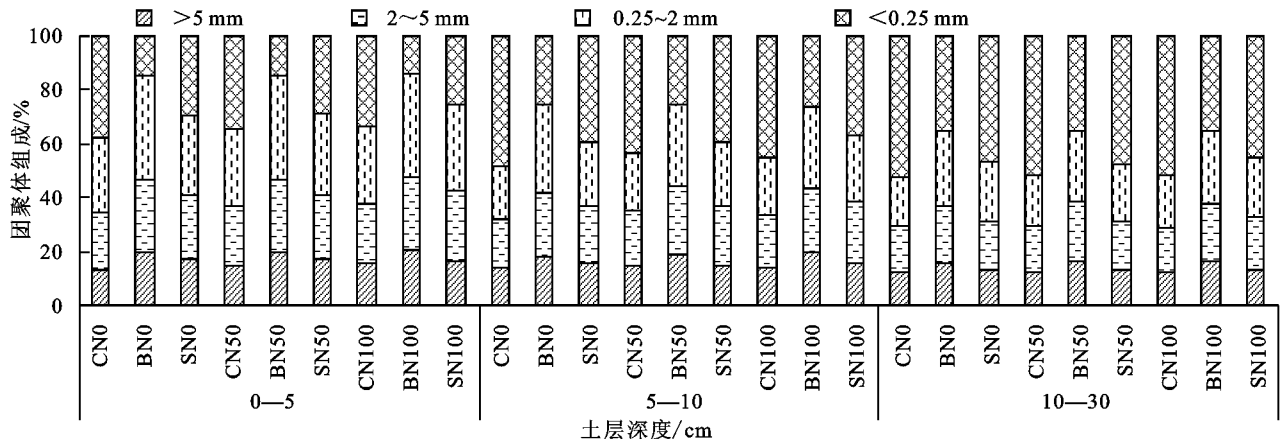


图 2 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

2.3.2 团聚体稳定性 由表 3 可知,各处理机械稳定性团聚体平均重量直径(MWD)均随土层加深而降低。3 个土层中,相同碳源添加下,不同氮素添加水平下各处理机械稳定性团聚体 MWD 差异较小,而相同氮素添加水平下,不同碳源添加处理差异较大,且生物质炭添加各处理的 MWD 均显著高于其他处理。在 0—5 cm 土层,生物质炭添加处理下 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理均值的 15.31% 和 30.23%;在 5—10 cm 土层,生物质炭

添加处理 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理均值的 18.10% 和 30.49%;在 10—30 cm 土层,生物质炭添加处理下 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理均值的 19.45% 和 30.21%。

2.4 水稳性团聚体

2.4.1 团聚体组成 由图 3 可知,不同处理下 ≥ 5 , 2~5, 0.25~2 mm 3 个粒级水稳性团聚体均随土层加深而降低,而 < 0.25 mm 粒级则反之。3 个土层中,各处理均以非水稳性团聚体(< 0.25 mm)含量最

高,水稳性团聚体含量随粒级变小而增加。各处理下,不同粒级水稳性团聚体含量均以添加生物质炭处理的最高,添加秸秆的次之,无碳源添加处理的最低,而非水稳性团聚体含量则以无碳源添加处理的最高。在 0—5 cm 土层,≥5,0.25~2 mm 粒级水稳性团聚体均以 N100 处理的最高,N0 处理的最低;2~5 mm 粒级水稳性团聚体则以 N50 处理(CN50、BN50、SN50 3 个处理的均值)的最高,N0 处理的最低;非水稳性团聚体含量则以 N0 处理的最高,N100 处理的最低。在 5—10 cm 土层,各粒级水稳性团聚均以 N100 处理的最高,N0 最低;而非水稳性团聚体则反之。在 10—30 cm 土层,≥5,2~5 mm 粒级水稳性团聚体均以 N100 处理最高,0.25~2 mm 粒级水稳性团聚体则以 N50 处理的最高,非水稳性团聚体含量则以 N0 处理的最高。

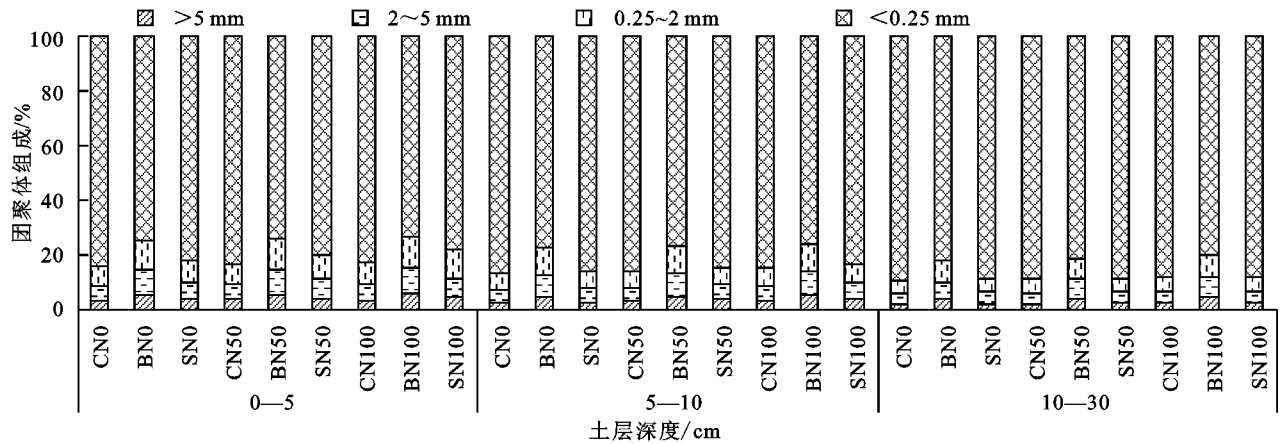


图 3 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤水稳性团聚体组成的影响

2.4.2 团聚体稳定性 由表 4 可知,各处理团聚体 MWD 均随土层加深而降低。3 个土层中,相同碳源添加下,不同氮素添加水平各处理 MWD 差异较小,而相同氮素添加水平下,不同碳源添加各处理差异较大,且生物质炭添加各处理的 MWD 均显著高于其他处理。在 0—5 cm 土层,生物质炭添加处理下 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理均值的 27.68% 和 50.37%;在 5—10 cm 土层,生物质炭添加处理下 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理的均值 37.60% 和 51.23%;在 10—30 cm 土层,生物质炭添加处理下 MWD 均值分别高于秸秆添加处理和无碳添加处理的均值 51.70% 和 55.53%。

2.5 产量

由图 4 可知,2015 年和 2016 年各处理产量均以 BN100 最高,且其显著高于其他处理,同时,氮素、秸秆、生物质炭对产量的效应均在 $P \leq 0.1\%$ 水平达到显著,氮素和生物质炭的交互效应对产量具有显著作用。2015 年,N100 水平的产量均值分别高于 N50 水平和 N0 水平平均产量的 9.86% 和 32.64%;生物质炭添加处理的平均产量分别高于秸秆添加处理和无

表 3 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤机械稳定性团聚体稳定性的影响

处理	MWD/mm		
	0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm
CN0	2.08d	1.95cd	1.78cd
BN0	2.87a	2.59a	2.27a
SN0	2.48b	2.25b	1.93b
CN50	2.26c	2.10bc	1.78cd
BN50	2.86a	2.69a	2.34a
SN50	2.48b	2.21b	1.91b
CN100	2.31c	2.05c	1.77cd
BN100	2.93a	2.68a	2.33a
SN100	2.55b	2.28b	1.97b
N	n. s	n. s	n. s
生物质炭	106.84***	104.24***	36.92***
秸秆	19.26***	12.17**	6.37**
N×生物质炭	n. s	n. s	n. s
N×秸秆	n. s	n. s	n. s

有机物料添加处理产量均值的 10.29% 和 19.83%。2016 年,N100 水平的产量均值分别高于 N50 水平和 N0 水平的平均产量的 18.28% 和 26.10%;生物质炭添加处理的平均产量分别高于秸秆添加处理和无有机物料添加处理产量均值的 6.84% 和 22.77%。

表 4 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

处理	MWD/mm		
	0—5 cm	5—10 cm	10—30 cm
CN0	0.62c	0.53c	0.46b
CN50	0.66c	0.59bc	0.47b
CN100	0.65cd	0.62b	0.51b
BN0	0.94a	0.84a	0.70a
BN50	0.96a	0.88a	0.74a
BN100	1.00a	0.92a	0.79a
SN0	0.70bc	0.58bc	0.48b
SN50	0.77b	0.65b	0.50b
SN100	0.81b	0.69b	0.50b
N	6.832**	6.266*	5.841*
生物质炭	272.32***	157.69***	43.63***
秸秆	35.56***	6.36*	n. s
N×生物质炭	n. s	n. s	n. s
N×秸秆	n. s	n. s	n. s

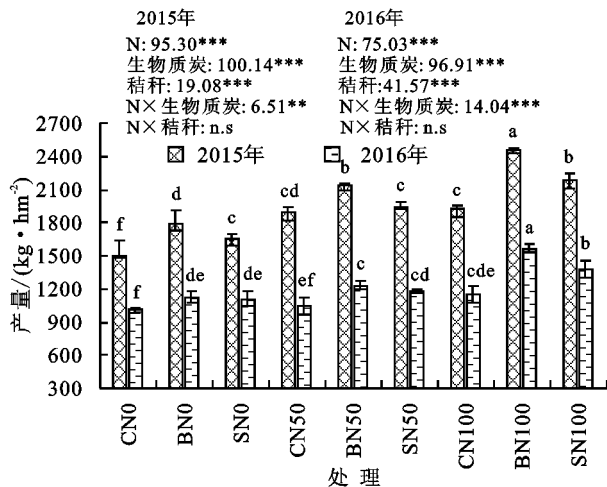


图 4 不同氮素水平下添加不同碳源对小麦产量的影响

3 讨论

生物质炭和秸秆可明显改善土壤理化性质,尤其是土壤物理性质^[1,9]。秸秆和生物质炭对土壤物理性质改良的原因基本相似。由于生物质炭是热解生成的产物,其本身具有巨大的比表面积和疏松多孔的结构^[6],加之其单位体积质量较低,施入土壤后可迅速降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,又因有机质作为土壤良好的胶结物质,可以提升土壤结构稳定性、

表 5 不同氮素水平下添加不同碳源对土壤有机质含量的影响

土层 深度/cm	土壤有机质含量/(g·kg ⁻¹)								
	CN0	BN0	SN0	CN50	BN50	SN50	CN100	BN100	SN100
0—5	17.69c	23.19a	20.50b	18.50c	23.69a	21.26b	18.50c	24.14a	21.29b
5—10	15.95e	20.53b	17.43d	16.84d	21.19ab	18.27c	17.00d	21.50a	18.36c
10—30	15.09c	17.64a	15.95b	16.08b	17.95a	15.95b	16.10b	18.17a	16.00b

武均等^[1]、张仁陟等^[17]通过研究长期保护性耕作定位试验发现,秸秆还田可显著提升团聚体稳定性。这主要是由于秸秆中含有大量的有机碳,秸秆还田可显著提升土壤有机碳含量,有机碳作为土壤团聚体重要的胶结物质,可将更多的黏、粉粒胶结在一起并转化为团聚体,进而显著提升团聚体含量和稳定性^[1,18]。生物质炭不仅具有较大的比表面积,而且含有有机大分子,同时添加生物质炭后提高了土壤微生物活性,增加了有机分泌物含量,进而促进土壤颗粒间相互团聚。但也有研究^[19]指出,生物炭可通过氢键、分子间的范德华力、表面库仑力等吸附在黏粒表面,进而阻碍黏粒之间的直接胶结,对团聚体大小与含量影响不显著。这可能与土壤类型、研究区域和生物质炭添加量有关。本研究发现,添加秸秆和生物质炭均可提升团聚体稳定性,但生物质炭优于秸秆。这可能与生物质炭中含有大量稳定碳素有关。本研究还发现,生物质炭对 0—30 cm 各土层机械稳定性团聚体和水稳性团聚体稳定性的提升均具有显著效应,而秸秆仅对 0—30 cm 各土层机械稳定性团聚体和

连续性^[7],进而提升土壤总孔隙度,降低土壤容重。

本研究结果表明,生物质炭在降低耕层土壤容重和提升总孔隙度方面均具有明显的效果,在 0—30 cm 土层内均具有明显的作用,特别在 0—10 cm 土层内,其作用更优于 10—30 cm 土层。但也有研究^[9-10]发现,生物质炭仅可显著降低 10 cm 以上土层的土壤容重,这可能与本试验采用翻耕有关,翻耕(耕深 18 cm 左右)可将生物质炭较为均匀的混合于耕层土壤中,同时也可能与生物质炭添加量、土壤类型等因素有关。众多研究^[10,17]均已证明秸秆还田可降低土壤容重,增加土壤总孔隙度。这主要与秸秆密度低于土壤矿质颗粒的密度有关。但是本研究发现,添加秸秆虽然可以降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,但只在 0—10 cm 土层有显著影响,这可能是由于:(1)土壤有机质表层富集;(2)试验年限较短,耕层有机质积累较少(表 5)。本研究还发现,较之秸秆,添加生物质炭对土壤饱和导水率的提升效果更好。研究指出土壤饱和导水率与土壤有机质含量和非毛管孔隙度有关。而添加生物质炭和秸秆均可增加土壤有机碳含量,同时这也与生物质炭本身具有疏松多孔的特性有关。

0—10 cm 水稳性团聚体的稳定性提升均有显著效应,其原因可能是添加生物质炭和秸秆后可缓冲外界作用力对土壤结构稳定性的破坏,同时也可减少土壤与华犁的接触,进而提升机械稳定性团聚体的含量;添加秸秆后土壤表层有机质含量高于其他土层^[1],这表明表层土壤有机胶结物质高于其他土层,因此短期的秸秆还田对表层土壤水稳性团聚体稳定性的提升高于其他土层。本试验仅进行了 4 年,为了更加精准、客观的评价秸秆和生物质炭对土壤团聚体稳定性的影响,还应观测不同年份土壤团聚体指标。

土壤有机质具有较强的亲水性,因此,添加秸秆和生物质炭均可提升土壤持水性^[10],进而促进作物产量。同时,添加秸秆和生物质炭可提升土壤阳离子交换量,增加土壤吸附阳离子的能力,进而提升土壤保肥能力^[7],加之秸秆和生物质炭中均含有一定量的养分元素,其也可促进作物生长。但生物质炭效果优于秸秆,这主要是由于生物质炭本身具有较大的比表面积,其可吸附更多的营养元素和水分。氮素作为禾本科作物生长必须的大量元素,其含量高低决定了作

物产量。通过前期研究^[17]发现,该区域小麦最佳施氮量为 100~105 kg/hm²,这和本研究结果(N100 处理下作物产量最高)吻合。因此,添加秸秆和生物质炭并不能完全取代氮肥,同时,生物质炭和秸秆对产量的提升作用可能更多的是由于改善了土壤物理性质而引起的。

4 结论

秸秆还田和生物质炭均可不同程度降低土壤容重,提升土壤总孔隙度,但是添加生物质炭对 0—30 cm 各土层的土壤容重和总孔隙度的效应均达到显著水平,而秸秆仅在 0—10 cm 土层达到显著水平。同时,生物质炭对土壤饱和导水率的提升效应高于秸秆输入的效应。添加生物质炭和秸秆均可提升土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量、稳定性,但生物质炭的效果最好。生物质炭对 0—30 cm 各土层机械稳定性团聚体和水稳性团聚体稳定性的提升均具有显著效应,而秸秆仅对 0—30 cm 各土层机械稳定性团聚体和 0—10 cm 土层的水稳性团聚体的稳定性提升均有显著效应。生物质炭和秸秆均可促进作物增产,但生物质炭效果最好,尤其是 BN100 处理。因此,添加生物质炭更有利于该区农田土壤物理性状的改善,作物产量的提升,以及该区农业可持续发展。

参考文献:

[1] 武均,蔡立群,齐鹏,等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015,23(3):276-284.

[2] 周江明,赵琳,董越勇,等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2):274-281.

[3] Yeboah S, Zhang R, Cai L, et al. Greenhouse gas emissions in a spring wheat-field pea sequence under different tillage practices in semi-arid Northwest China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106(1): 77-91.

[4] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(5):526-535.

[5] Pütün E. Pyrolysis: A sustainable way from biomass to biofuels and biochar [M]. New York: Cambridge University Press; 2016.

[6] 朱敏,石云翔,孙志友,等. 秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017,25(7):1025-1033.

[7] 李中阳,齐学斌,樊向阳,等. 生物质炭对冬小麦产量,水分利用效率及根系形态的影响[J]. 农业工程学报, 2015,31(12):119-124.

[8] Jiang X, Deneff K, Stewart C E, et al. Controls and dynamics of biochar decomposition and soil microbial abundance, composition, and carbon use efficiency during long-term biochar-amended soil incubations [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(1): 1-14.

[9] 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011,22(11):2930-2934.

[10] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2013,47(2):366-373.

[11] Biswas A K, Mohanty M, Hati K M, et al. Distillery effluents effect on soil organic carbon and aggregate stability of a Vertisol in India [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009,104(2): 241-246.

[12] Liu X H, Feng P H, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2012, 14(6): 975-979.

[13] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature and duration dependent rice straw derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.

[14] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2008,171(4): 591-596.

[15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978.

[16] 许明祥,刘国彬,卜崇峰,等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):54-58.

[17] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1):61-69.

[18] Song K, Yang J, Xue Y, et al. Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: e36602.

[19] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016,37(1):293-300.