

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.034

黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响

魏永霞^{1,2} 石国新¹ 冯超¹ 吴昱^{3,4} 刘慧^{2,5}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090; 4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;

5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明黑土区施加生物炭对土壤结构、土壤肥力和作物产量及其可持续性的影响,以东北黑土区 3°坡耕地田间径流小区为研究对象,进行了为期 4 年的观测。2015 年按照生物炭的施加量共设置 C0(0 t/hm²)、C25(25 t/hm²)、C50(50 t/hm²)、C75(75 t/hm²)、C100(100 t/hm²)5 个处理,2016—2018 年分别连续施加等量的生物炭。结果表明:连续 4 年随施炭量的增加土壤容重呈逐渐降低趋势、孔隙度呈逐渐升高趋势,且施用年限越长,作用越明显;连续 4 年广义土壤结构系数(GSSI)随施炭量的增加呈先增大后减小的变化趋势,土壤三相结构距离指数(STPSD)呈先减小后增大的变化趋势,均在第 2 年 C50 处理取得最大(小)值(98.31、4.87),同时土壤三相比最接近理想状态;连续 4 年大于 0.25 mm 的土壤团聚体含量($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)随施炭量的增加均呈先增大后减小的变化趋势,均在第 2 年 C50 处理取得最大值;连续 4 年土壤速效钾、有机质含量随施炭量的增加逐渐升高,土壤碱解氮和有效磷含量先增加后减小,各年份土壤碱解氮和有效磷含量提高最多的分别为 C50(46.1%、76.6%)、C50(46.4%、85.4%)、C25(33%、100.7%)、C25(23.9%、103.2%);连续 4 年施加生物炭均可提高大豆产量、单株荚数、单株粒数和百粒质量,在第 2 年 C50 处理增产最大,增产率为 33.3%,同时产量可持续性最强,产量可持续性特征指数(SYI)为 0.871。

关键词: 生物炭; 广义结构系数; 三相结构距离指数; 平均质量直径; 几何平均直径; 产量可持续性指数

中图分类号: S157.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0309-12

Effects of Applying Biochar on Soil Structure and Soybean Yield on Slope Farmland in Black Soil Region

WEI Yongxia^{1,2} SHI Guoxin¹ FENG Chao¹ WU Yu^{3,4} LIU Hui^{2,5}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China

4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

5. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to find out the effects of applying biochar on soil structure, soil fertility and crop yield and its sustainability in the black soil region, the field runoff plot of 3° sloping farmland in the black soil region of Northeast China was taken as the research object, and a four-year observation was carried out. In 2015, according to the amount of biochar applied, five treatments of C0 (0 t/hm²), C25 (25 t/hm²), C50 (50 t/hm²), C75 (75 t/hm²), and C100 (100 t/hm²) were set. The treatments were applied as the same amount of biochar in 2016, 2017 and 2018. The results showed that the soil bulk density was decreased gradually with the increase of biochar application and the porosity was increased gradually, and the longer the application period was, the more obvious the effect was. The generalized soil structure

收稿日期: 2018-12-28 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

作者简介: 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

coefficient (GSSI) of the four consecutive years was increased first and then decreased with the increase of biochar loading, the soil three-phase structure distance index (STPSD) was decreased first and then increased, and the maximum (minimum) value (98.31, 4.87) was obtained in the second year of C50 treatment. At the same time, the three-phase ratio of soil was the closest to the ideal state. the contents of macro-aggregates ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) for four consecutive years were increased first and then decreased with the increase of biochar loading. The decreasing trend was the maximum in the C50 treatment in the second year. The soil available potassium and organic matter were increased gradually with the increase of biochar application for four consecutive years, and the soil available nitrogen and available phosphorus were increased first and then decreased. The highest increase of soil available nitrogen and available phosphorus in each year were C50 (46.1%, 76.6%), C50 (46.4%, 85.4%), C25 (33%, 100.7%) and C25 (23.9%, 103.2%). The application of biochar for four consecutive years can increase the yield of soybean and its components. In the second year, the C50 treatment increased the maximum yield, the yield was increased by 33.3%, and the yield was the most sustainable. The sustainability yield index (SYI) was 0.871. The research results can provide theoretical support for actual production.

Key words: biochar; generalized soil structure index; soil three-phase structure distance index; mean weight diameter; geometric mean diameter; sustainability yield index

0 引言

东北黑土区是世界上仅有的三大黑土带之一,土质肥沃,是我国重要的商品粮基地。长期以来由于不合理的人类活动及自然条件的影响,水土流失严重,黑土层逐年减薄,严重影响着黑土区农业水土资源的可持续利用,对国家粮食安全构成了极大威胁。该区秸秆资源丰富,但被利用的秸秆资源相对较少。大量秸秆资源在田间就地焚烧或弃用,不仅造成秸秆资源的浪费,而且对大气造成严重污染^[1]。秸秆还田作为一种新型高效技术,不仅可以实现对秸秆的重新利用,还可以改善土壤结构、提高土壤肥力和农作物产量,在实施低碳环保的同时增加农作物产量,达到环保增产的双重收益,这对推动黑土区农业健康可持续性发展有着重大意义。但秸秆还田过程中秸秆腐烂所产生的温室气体加剧了碳排放,势必会对环境产生影响^[2]。

生物炭(Biochar)是以作物秸秆、动物粪便为原材料,在缺氧或低氧条件下缓慢高温裂解获得的一类富含碳的有机质^[3]。生物炭作为土壤改良剂,具有容重小、比表面积大、吸附性强等特性,被广泛应用于农业、环境等领域^[4]。近年来,有关生物炭应用在农业上的研究越来越多。在改善土壤结构方面,前人研究表明,施加生物炭可以改善土壤理化性质、降低土壤容重、提高孔隙度^[5-9]、改善土壤团聚体结构^[10-12]、稳固土壤三相比例^[13];在土壤肥力方面,相关研究认为,施加生物炭可以提高土壤有效磷、速效钾含量^[14-16];在增产稳产方面,国内外学者也进行了大量研究,认为施加生物炭可以大幅度提高农作物产量^[17-19],并且维持高产稳产性^[20]。

生物炭具有极强的稳定性,施入土壤后对土壤的作用具有长久性。目前,相关研究多是以短期施加生物炭为条件,研究生物炭对土壤理化性质的影响,而在研究多年连续施加生物炭对土壤结构和产量的影响方面却鲜有报道。另外,不同生物炭施加量对土壤改良和增产效果存在较大的差异,且随着连续施用年限的增加,生物炭施加剂量和年际间的合理分配尚不明晰。为了探索黑土资源的高效利用与保护,以及大量秸秆资源的合理利用途径,本研究以大豆为供试作物,以黑土区坡耕地田间径流小区为研究对象,连续4年施加生物炭,旨在探索不同施炭量和施用年限条件下,黑土区土壤结构、土壤肥力和大豆产量的变化规律,以及产量可持续性能,为黑土区生物炭施加量的确定和施用年限的合理分配提供依据,同时为农作物秸秆资源化利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验基地位于黑龙江省北安市(48°02'~48°17'N,126°47'~127°15'E),属寒温带大陆性气候。全年平均降水量555.3 mm,降雨集中在7—9月,约占全年90%左右。积温2254.5℃,无霜期110~115 d。耕地多为丘陵漫岗,土质肥沃,地势由东向西倾斜,岗顶平缓,坡面较长,坡度为3°~5°。土壤为草甸黑土,疏松通透性好,但水土流失严重,侵蚀沟恶性扩张,表层黑土急剧流失,黑土层厚度变薄,土壤结构恶化。主要农作物为大豆、玉米、水稻。

1.2 试验设计

试验于2015—2018年在北安市红星农场内坡

度为 3° 的径流小区进行, 试验条件是天然降雨。小区规格 20 m × 5 m, 每两个小区间隔 1 m。为了防止侧渗各小区边界用深入地下 1 m 的铁板隔开。每个小区埋设 TDR 管, 埋深 1.8 m。小区末端, 设径流自动记录系统和泥沙收集系统, 自动记录后的径流排入区外排水沟。试验共设 5 个处理, 即不加生物炭的常规处理 C0(对照处理) 和生物炭施加量分别为 C25(25 t/hm²)、C50(50 t/hm²)、C75(75 t/hm²)、C100(100 t/hm²) 的处理, 2 次重复, 共计 10 个径流小区。试验开始前将生物炭均匀铺撒于土壤表面并反复搅拌, 使其与表层土壤(0~20 cm 土层) 混合均匀。试验连续 4 年种植大豆, 并施加重茬肥。2016、2017、2018 年分别在上一年的试验基础之上加入等量的生物炭, 并做相同的处理。

供试土壤为草甸黑土, 理化性质为 pH 值 6.3, 土壤容重 1.15 g/cm³, 有机质质量比 34.83 g/kg, 全氮质量比 1.1 g/kg, 全磷质量比 0.45 g/kg, 全钾质量比 0.35 g/kg, 土壤质地黏重, 透水性差。供试大豆品种为黑河三号。供试玉米秸秆生物炭购于辽宁金和福农业开发有限公司, 制备方式为无氧条件 450℃ 高温裂解, 基粒径 1.5~2.0 mm, 生物炭性质为 pH 值 9.14, 全碳质量分数 70.21%, 全氮质量分数 1.53%, 硫质量分数 0.78%, 钾质量分数 1.68%, 灰分质量分数 31.8%。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 土壤容重、孔隙度、三相比

各年份全生育期末利用环刀收集耕层原状土, 各处理 4 次重复(相同处理小区各取 2 次重复), 采用 DIK-1130 型土壤三相仪测定土壤容重、孔隙度和土壤三相比, 并计算广义土壤结构系数(GSSI) 和土壤三相结构距离指数(STPSD)^[21], 计算公式为

$$P_{GSSI} = [(X_S - 25)X_L X_C]^{0.4769} \quad (1)$$

$$P_{STPSD} = (X_S - 50)^2 + (X_S - 50)(X_L - 25) + (X_L - 25)^2 \quad (2)$$

式中 P_{GSSI} ——广义土壤结构系数

P_{STPSD} ——土壤三相结构距离指数

X_S ——固相体积分数, 大于 25%

X_L ——液相体积分数

X_C ——气相体积分数

1.3.2 土壤水稳性团聚体含量

各年份在大豆全生育期末取各小区耕层土壤样品, 采集后在室内风干, 过 8 mm 筛, 除去其中较大杂质。采用 TTF-100 型土壤团聚体分析仪测定土壤水稳性团聚体含量, 即根据干筛各级团聚体质量分数配比土壤样品 50 g, 置于孔径自上而下为 5、2、1、0.5、0.25 mm 的各级套筛之上, 40 r/min 振荡

20 min。将各筛上的团聚体分别冲洗至铝盒中, 在 105℃ 下干燥, 称质量。分别计算大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)^[22]、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)^[18], 公式为

$$R_{0.25} = (M_{r>0.25}/M_T) \times 100\% \quad (3)$$

$$P_{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (4)$$

$$P_{GWD} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \lg X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (5)$$

式中 $M_{r>0.25}$ ——粒径大于 0.25 mm 团聚体质量和
 M_T ——所有粒径团聚体质量和
 P_{MWD} ——团聚体平均质量直径, mm
 X_i ——各粒级团聚体的平均直径, mm
 W_i ——对应于 X_i 的团聚体质量分数
 P_{GWD} ——几何平均直径, mm

1.3.3 土壤养分含量

于大豆收获期末取耕层土壤测定土壤养分含量。每个处理随机取样 3 次。碱解氮含量使用碱解扩散法; 有效磷含量采用 Olsen 法; 速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法; 土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加加热法测定。

1.3.4 产量及其可持续性指标

于大豆收获期在相同处理的径流小区的坡上和坡下相应位置分别选取 2 个 10 m² 的地块, 每个地块随机选取 5 株豆秆测量单株荚数、单株粒数等, 并对所选地块进行实收测产, 计算大豆总产量。大豆产量可持续性指标用产量可持续性指数(Sustainable yield index, SYI)^[23] 表示, 公式为

$$P_{SYI} = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max} \quad (6)$$

式中 P_{SYI} ——产量可持续性指数

\bar{Y} ——大豆平均年产量, t/hm²

σ ——标准差, t/hm²

Y_{\max} ——试验点最高产量, t/hm²

1.4 数据处理方法

应用 Microsoft Excel 2010、Origin 8.5 对数据进行处理与绘图。采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析, LSD 法进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤结构的影响

2.1.1 对土壤容重、孔隙度的影响

土壤容重、孔隙度可以衡量土壤的松紧状态和结构状况。各年份的容重、总孔隙度如表 1 所示。由表 1 可知, 在施用年限相同而施炭量不同时, 连续

4年随施炭量的增加,土壤容重逐渐降低、总孔隙度逐渐升高,但随着施用年限的增加土壤容重、总孔隙度降低、升高的速率却逐渐变缓。2015—2018年各处理的土壤容重较C0处理分别降低1.7%~6%、2.6%~8.7%、2.6%~9.7%、2.7%~9.8%,土壤总孔隙度较C0分别升高4%~12.7%、10%~23.4%、14%~25.7%、11.7%~27.9%,各处理与C0差异均达显著性水平($P < 0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时,随着施用年限的增加,土壤容重逐渐降低,总孔隙度逐渐升高,且随着施炭量的增加,土壤容重、总孔隙度

降低和升高速率也逐渐变缓。2016—2018年较2015年C25处理土壤容重降低了1.7%~5.2%,总孔隙度升高了3%~5%;2018年的C50、C75、C100较2015年容重降低了7.1%、8.9%、6.4%,总孔隙度升高了10.2%、12.5%、11.1%。综合4年试验结果分析,在相同的施用年限条件下,生物炭施用量越大,土壤容重越低、总孔隙度越高,且随着施用年限的增加,土壤容重下降的速率变缓,总孔隙度升高的速率也变缓。在相同施炭量水平下,随着施用年限的增加,土壤容重降低、总孔隙度增加。

表1 2015—2018年各处理土壤容重和总孔隙度

Tab.1 Soil bulk density and total porosity of each treatment in 2015—2018

处理	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)				总孔隙度/%			
	2015年	2016年	2017年	2018年	2015年	2016年	2017年	2018年
C0	(1.16 ± 0.001 2) ^a	(1.15 ± 0.004 3) ^a	(1.13 ± 0.000 5) ^a	(1.12 ± 0.003 5) ^a	(49.67 ± 2.32) ^d	(48.33 ± 1.69) ^d	(48.63 ± 0.98) ^d	(48.62 ± 1.12) ^d
	(1.14 ± 0.000 8) ^b	(1.12 ± 0.003 6) ^b	(1.10 ± 0.005 6) ^{bc}	(1.09 ± 0.006 6) ^b	(51.67 ± 3.36) ^c	(53.24 ± 3.64) ^c	(55.44 ± 3.16) ^c	(54.3 ± 3.63) ^c
C25	(1.12 ± 0.004 3) ^{bc}	(1.07 ± 0.001 5) ^c	(1.06 ± 0.002 7) ^{bc}	(1.04 ± 0.001 6) ^c	(52.83 ± 4.6) ^b	(55.78 ± 4.21) ^{bc}	(57.12 ± 1.07) ^{bc}	(58.26 ± 3.96) ^{bc}
	(1.12 ± 0.002 6) ^{bc}	(1.05 ± 0.002 9) ^{cd}	(1.03 ± 0.004 5) ^c	(1.02 ± 0.004 8) ^c	(53.45 ± 1.23) ^b	(58.00 ± 6.05) ^b	(59.5 ± 4.42) ^b	(60.12 ± 7.92) ^b
C50	(1.09 ± 0.006 1) ^c	(1.05 ± 0.030 0) ^{cd}	(1.02 ± 0.004 1) ^c	(1.01 ± 0.010 0) ^{cd}	(56.00 ± 2.36) ^a	(59.62 ± 5.69) ^a	(61.13 ± 5.46) ^a	(62.23 ± 5.68) ^a

注:数据均是各处理重复的均值 ± 标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.1.2 对土壤三相的影响

理想状态下,最适合作物生长的土壤三相比为50:25:25(固相:液相:气相)^[13]。本研究各年份的土壤三相比如图1所示。由图1可知,连续4年分别为C75、C50、C50、C25处理与理想点最接近,三相比分别为47.6:29.23:23.17、50.88:25.63:23.49、48.22:26.63:25.15和51.83:24.92:23.25。由图1a可知,2015年随施炭量的增加土壤固相体积分数逐渐下降,液相、气相逐渐升高,施加生物炭各处理的土壤固相体积分数较C0降低幅度为1.46%~15.47%,土壤液相体积分数升高幅度为0.2%~16.11%,土壤气相体积分数提高最大处理较C0提高了22.3%;图1b~1d表明,2016—2018年土壤固相、气相体积分数与2015年变化趋势相同,而液相体积分数呈先升高后降低的变化趋势。GSSI、STPSD常被用来评价土壤三相比例分配,通常情况下,GSSI越大,STPSD越小,土壤三相比例分配越接近理想状态^[24]。GSSI和STPSD如表2所示。由表2可知,在施用年限相同施炭量不同时,连续4年随施炭量的增加,GSSI先增大后减小,均在C50处理达到最大,较C0处理分别增加了3.33%、

4.75%、3.92%和3.99%,达到显著性差异($P < 0.05$);随着施炭量的增加STPSD先减少后增加,各年均均在C50处理达到最小,较C0处理分别降低了66.28%、79%、71.44%和51.39%,差异显著($P < 0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时,C25、C50处理土壤GSSI随着施用年限的增加呈先增后减的变化趋势,STPSD呈先减后增的趋势;C75、C100处理GSSI随着施用年限的增加逐渐减小,C100处理的土壤STPSD随施用年限的增加呈逐渐增大的变化趋势。由此可见,适量的生物炭可以调节土壤中的水、气含量,施炭量过高会使土壤松散,土壤结构变差。另外,C25、C50处理连续施加2年对土壤三相调节相对较好,而C75、C100处理逐年施加对土壤三相的调节逐渐变差。对比4年试验数据可知,以2016年C50处理GSSI最大、SYPSD最小,连续施加2年50 t/hm²的生物炭对黑土区土壤三相改善相对较好。

2.1.3 对土壤水稳性团聚体含量的影响

各年份不同粒径土壤水稳性团聚体含量如表3所示。由表3可知施加生物炭提高了大于0.25 mm粒径团聚体含量。2015年0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、

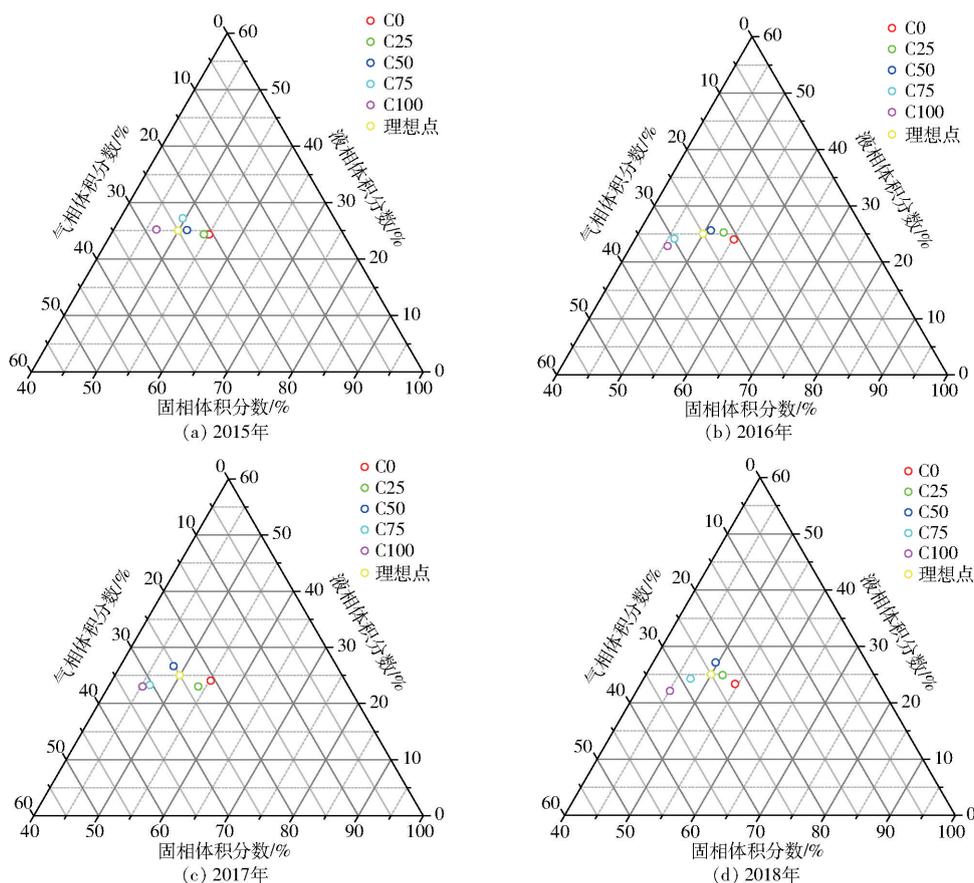


图 1 2015—2018 年各处理土壤三相比

Fig. 1 Soil three-phase ratio tested in each treatment in 2015—2018

表 2 2015—2018 年各处理广义结构系数和土壤三相结构距离指数

Tab. 2 GSSI and STPSD of each treatment in 2015—2018

处理	2015 年		2016 年		2017 年		2018 年	
	GSSI	STPSD	GSSI	STPSD	GSSI	STPSD	GSSI	STPSD
C0	94.12 ^c	22.63 ^a	93.85 ^c	23.19 ^b	94.14 ^c	23.25 ^b	94.02 ^c	15.49 ^b
C25	94.97 ^b	15.86 ^b	96.69 ^b	14.66 ^c	96.30 ^b	11.06 ^c	96.24 ^a	14.94 ^b
C50	97.25 ^a	7.63 ^d	98.31 ^a	4.87 ^d	97.83 ^a	6.64 ^d	97.18 ^b	7.53 ^c
C75	96.84 ^{ab}	11.15 ^c	93.58 ^c	12.16 ^c	91.55 ^d	11.04 ^c	91.21 ^c	10.80 ^{bc}
C100	96.40 ^{ab}	15.28 ^{cd}	93.30 ^c	33.09 ^a	91.77 ^d	35.92 ^a	91.03 ^d	46.38 ^a

1 ~ 2 mm 粒级水稳性团聚体含量均在 C75 处理达到最大,与 C0 相比均达到显著性水平 ($P < 0.05$); 2016—2018 年大于 0.25 mm 的各粒级水稳性团聚体含量变化规律与 2015 年大体相同,各年最优处理分别为 C50、C50、C25,与同年 C0 相比均达显著性差异 ($P < 0.05$),但 2017 年 C100 处理和 2018 年 C75、C100 处理的 1 ~ 2 mm、2 ~ 5 mm 粒级水稳性团聚体含量却低于对照处理,可见累积施炭量过高会使 1 ~ 5 mm 粒级水稳性团聚体含量降低。 $R_{0.25}$ 被用来表征土壤团聚体稳定性,其含量越高,土壤结构性越好,稳定性越强,土壤抗蚀能力越强^[22]; MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布的重要指标,其值越大,说明土壤平均团聚度越好,稳定性越好^[25]。表 4 为土壤水稳性团聚体稳定性指数。由表 4 可

知,在施用年限相同施炭量不同时, $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 随施炭量的增加均呈先增后减的变化趋势,连续 4 年最优处理分别为 C75、C50、C50 和 C25,施加生物炭的各处理与同年 C0 相比均达到显著性差异 ($P < 0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时, C25、C50 处理随施用年限的增加均呈先增大后减小的变化趋势,而 C75、C100 处理随施用年限的增加呈逐渐减小的变化趋势。由此可知,适量的生物炭可以调节土壤团粒结构, C25、C50 处理连续施加 2 年对土壤团粒结构的改善相对较好,而 C75、C100 处理逐年施加对土壤团粒结构的改善逐渐变差。对比 4 年试验结果分析,2016 年 C50 处理的生物炭对 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 提升最大,与同年对照处理相比分别提高了 70.2%、26.1% 和 23.2%,即连续 2 年施

表3 2015—2018年各粒级水稳性团聚体分布
Tab.3 Distribution of water stable agglomerate in 2015—2018

年份	处理	团聚体粒径/mm				
		0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~5	>5
2015	C0	(6.71 ± 0.21) ^c	(4.28 ± 0.12) ^c	(3.43 ± 0.08) ^c	(3.84 ± 0.13) ^c	(0.50 ± 0.04) ^c
	C25	(6.91 ± 0.16) ^{bc}	(8.98 ± 0.36) ^b	(3.57 ± 0.06) ^{bc}	(4.03 ± 0.07) ^{bc}	(1.00 ± 0.07) ^{bc}
	C50	(8.86 ± 0.08) ^b	(12.31 ± 0.43) ^{ab}	(3.19 ± 0.11) ^b	(4.86 ± 0.21) ^a	(1.12 ± 0.12) ^{bc}
	C75	(10.15 ± 0.11) ^a	(13.21 ± 0.24) ^a	(3.77 ± 0.09) ^a	(4.64 ± 0.15) ^b	(1.64 ± 0.11) ^b
	C100	(7.73 ± 0.13) ^b	(7.57 ± 0.14) ^{bc}	(3.06 ± 0.04) ^{bc}	(4.26 ± 0.1) ^b	(2.21 ± 0.16) ^a
2016	C0	(6.28 ± 0.09) ^c	(6.28 ± 0.08) ^c	(4.5 ± 0.16) ^c	(3.04 ± 0.12) ^c	(1.2 ± 0.13) ^c
	C25	(6.41 ± 0.12) ^{bc}	(7.47 ± 0.16) ^b	(4.41 ± 0.12) ^{ab}	(4.25 ± 0.16) ^b	(1.32 ± 0.21) ^b
	C50	(9.78 ± 0.18) ^a	(11.33 ± 0.05) ^a	(6.86 ± 0.06) ^a	(5.44 ± 0.26) ^a	(1.36 ± 0.06) ^{ab}
	C75	(7.45 ± 0.06) ^b	(10.25 ± 0.13) ^{ab}	(3.65 ± 0.23) ^b	(4.59 ± 0.31) ^b	(1.42 ± 0.16) ^a
	C100	(8.86 ± 0.11) ^{ab}	(8.8 ± 0.09) ^b	(3.21 ± 0.14) ^c	(2.97 ± 0.22) ^c	(1.38 ± 0.03) ^{ab}
2017	C0	(6.92 ± 0.23) ^c	(4.16 ± 0.12) ^c	(3.4 ± 0.12) ^{bc}	(3.4 ± 0.26) ^c	(0.56 ± 0.03) ^c
	C25	(7.21 ± 0.03) ^{bc}	(9.85 ± 0.13) ^b	(3.02 ± 0.16) ^c	(4.32 ± 0.26) ^a	(0.96 ± 0.13) ^{bc}
	C50	(7.46 ± 0.16) ^b	(12.32 ± 0.06) ^a	(4.61 ± 0.09) ^a	(4.38 ± 0.08) ^a	(2.61 ± 0.31) ^a
	C75	(7.32 ± 0.12) ^{bc}	(11.46 ± 0.16) ^{ab}	(3.89 ± 0.06) ^b	(3.69 ± 0.34) ^b	(1.23 ± 0.31) ^b
	C100	(8.36 ± 0.10) ^a	(8.36 ± 0.24) ^b	(3.32 ± 0.13) ^{bc}	(3.03 ± 0.21) ^c	(1.56 ± 0.16) ^b
2018	C0	(6.68 ± 0.03) ^c	(5.02 ± 0.21) ^c	(3.68 ± 0.03) ^c	(4.12 ± 0.06) ^b	(0.28 ± 0.01) ^c
	C25	(7.69 ± 0.11) ^a	(11.24 ± 0.04) ^a	(5.51 ± 0.19) ^a	(5.0 ± 0.12) ^a	(2.36 ± 0.16) ^a
	C50	(7.43 ± 0.13) ^a	(8.65 ± 0.23) ^b	(4.36 ± 0.11) ^b	(4.45 ± 0.0) ^b	(0.56 ± 0.06) ^{bc}
	C75	(7.12 ± 0.13) ^b	(8.46 ± 0.11) ^b	(3.21 ± 0.21) ^c	(3.09 ± 0.21) ^c	(1.06 ± 0.33) ^b
	C100	(6.32 ± 0.09) ^c	(7.36 ± 0.02) ^{bc}	(2.12 ± 0.14) ^c	(2.23 ± 0.14) ^c	(1.02 ± 0.26) ^b

表4 2015—2018年水稳性团聚体稳定性指数

Tab.4 MWD and GMD in 2015—2018

年份	处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$
2015	C0	0.622 ^c	0.209 ^c	37.5 ^c
	C25	0.695 ^b	0.231 ^b	48.9 ^b
	C50	0.735 ^a	0.242 ^{ab}	60.9 ^a
	C75	0.756 ^a	0.253 ^a	66.8 ^a
	C100	0.712 ^{ab}	0.221 ^b	49.6 ^b
2016	C0	0.639 ^c	0.212 ^c	42.6 ^c
	C25	0.724 ^b	0.233 ^b	47.7 ^b
	C50	0.777 ^a	0.263 ^a	69.5 ^a
	C75	0.739 ^b	0.236 ^{ab}	54.7 ^{ab}
	C100	0.702 ^b	0.220 ^b	48.7 ^{ab}
2017	C0	0.607 ^c	0.203 ^c	36.8 ^c
	C25	0.693 ^b	0.223 ^b	50.7 ^{ab}
	C50	0.743 ^a	0.243 ^a	62.8 ^a
	C75	0.723 ^{ab}	0.220 ^b	55.1 ^{ab}
	C100	0.661 ^b	0.213 ^b	46.2 ^b
2018	C0	0.603 ^c	0.202 ^c	39.5 ^c
	C25	0.645 ^a	0.241 ^a	63.6 ^a
	C50	0.636 ^{ab}	0.231 ^b	50.9 ^b
	C75	0.621 ^b	0.212 ^{bc}	45.9 ^{bc}
	C100	0.596 ^c	0.198 ^c	38.8 ^c

加 50 t/hm² 的生物炭对土壤稳定性的提升效果最优。

2.2 施加生物炭对土壤肥力的影响

土壤养分是土壤的本质属性,其含量的高低直

接影响作物产量。图2为不同处理的土壤养分含量。由图2a、2b可知,在施用年限相同施炭量不同时,土壤碱解氮和有效磷含量随施炭量的增加呈先增大后减小的变化趋势,2015、2016年均均在C50处理增加到最大值,其中2015年较C0处理分别升高46.1%、76.6%,差异达到显著性水平($P < 0.05$),2016年较C0处理分别提高了46.4%、85.4%,差异显著($P < 0.05$);2017、2018年在C25处理提高效果最优,分别较同年C0处理提高33%、100.7%、23.9%、103.2%,达到显著性差异($P < 0.05$),但这两年的C100处理土壤碱解氮含量仅低于对照处理5.1%、10.8%,有效磷含量低于对照处理7.2%、9.5%,均未达到显著水平($P > 0.05$)。由图2c、2d可知,施加生物炭可以提高土壤速效钾、有机质含量,连续4年土壤速效钾、有机质含量随施炭量的增加呈逐渐升高的趋势,且升高的速率逐渐减缓,各年施加生物炭处理较C0差异均达显著水平($P < 0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时,施加生物炭处理的碱解氮和有效磷含量均随着施用年限的增加呈先增加后减小的变化趋势。C25处理的土壤碱解氮和有效磷含量在2017年达到最大,C50、C75、C100均在2016年达到最大;施加生物炭处理的速效钾和有机质含量随施用年限的增加而逐渐增大,且施用年限越久,增加的速率越缓慢。综合4年

试验结果分析,适量的生物炭可有效提高土壤肥力,但施炭量过高会使碱解氮、有效磷含量降低,当累积施炭量过高时会导致碱解氮、有效磷含量过低,不利于大豆生长;另一方面,逐年施加 25 t/hm^2 的生物炭

在第 3 年对土壤碱解氮、有效磷含量提高最大,对于 C50、C75、C100 处理连续 2 年施加效果最好;土壤速效钾、有机质含量随施炭量的升高逐渐升高,且随着年限的增加,升高的速率变缓。

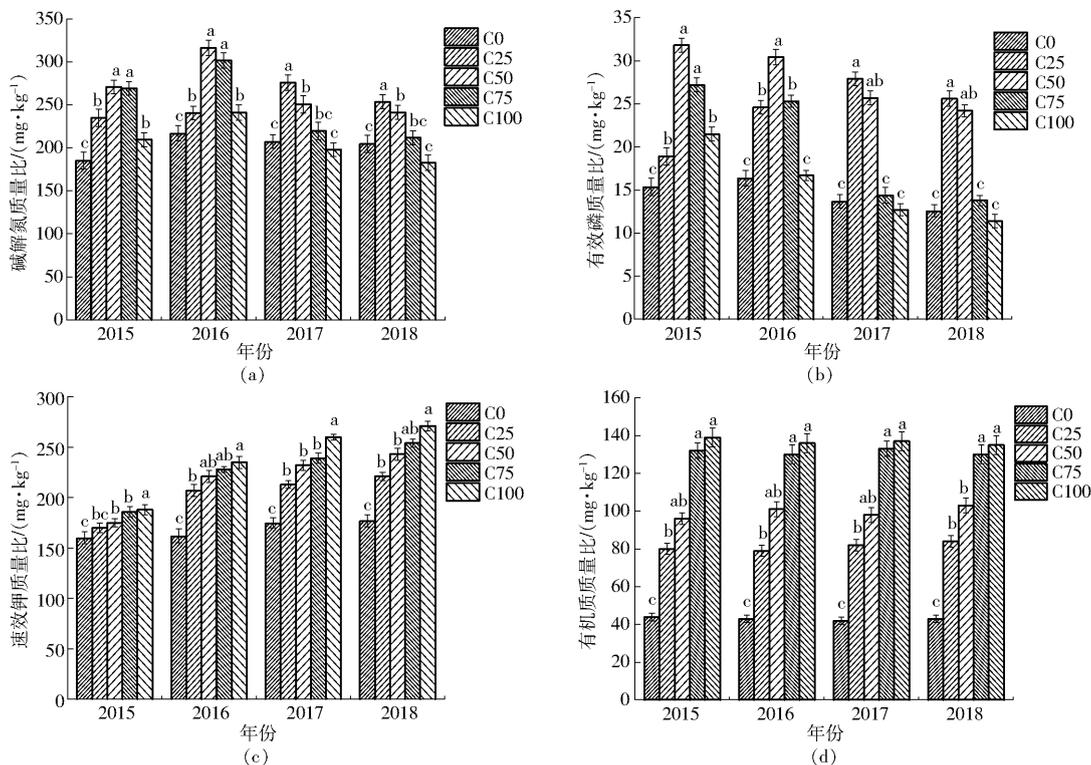


图 2 2015—2018 年各处理土壤养分含量

Fig. 2 Soil nutrient content in 2015—2018

2.3 施加生物炭对大豆产量及其可持续性的影响

2.3.1 对大豆产量及其构成要素的影响

各年份大豆产量及其构成要素如表 5 所示。由表 5 可知,连续 4 年施加生物炭对大豆产量及其构成要素有显著的影响。在施用年限相同施炭量不同时,大豆产量随施炭量的增加呈先增后减的变化趋势,2015 年产量由大到小依次为 C75、C100、C50、C25,其中 C75 处理较 C0 提高了 21.8%,达到显著性差异 ($P < 0.05$);2016、2017 年在 C50 处理增产率达到最大,为 33.3%、24.1%;2018 年 C25 处理增产率最高,增产率为 17.9%,而 C100 处理产量却低于对照处理 6.3%,与 C0 相比差异不显著 ($P > 0.05$)。连续 4 年大豆单株荚数、单株粒数和百粒质量的变化规律与大豆产量大致相同,最优处理也分别为 C75、C50、C50、C25,与同年 C0 相比差异均显著 ($P < 0.05$);而 2018 年 C100 处理大豆单株荚数、单株粒数和百粒质量低于对照处理 2.7%、1.5%、3.6%,差异不显著 ($P > 0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时,C25 处理产量随着施用年限的增加呈逐渐升高趋势,2018 年较 2015 年增加了 13.3%;C50 处理产量随着施用年限的增加呈先升高后降低

趋势,在 2016 年产量达到最大,较 2015 年增加了 15.2%,而 2018 年较 2015 年产量仅提高了 0.8%;C75、C100 处理随着施用年限的增加呈逐渐降低趋势,2018 年较 2015 年分别降低了 12.6%、18.5%。随着施用年限的增加各处理大豆单株荚数、单株粒数和百粒质量与产量的变化规律大体相同,但 C50 处理的产量构成要素在 2017 年达到最大值。综合分析可知,施加适量的生物炭可提高大豆产量及其构成要素,但施炭量或累积施炭量过高均会使增产效果减弱甚至减产。另外,逐年施加 25 t/hm^2 的生物炭会使产量提高,逐年施加 50 t/hm^2 在第 2 年产量达到最大,而 C75、C100 处理逐年施加会使产量逐渐降低。

2.3.2 对产量可持续性的影响

产量可持续性指数 (SYI) 是评价作物产量可持续性的一个重要指标,通常情况下,SYI 越大,产量的可持续性越高^[26]。图 3a、3b 为不同施炭量水平下大豆平均年产量和 SYI。由图可知,施加生物炭对大豆平均年产量有较大的影响,平均年产量与施炭量呈抛物线关系 (R^2 为 0.9864, P 为 0.0039),在 C50 处理平均年产量达到最大,为 $2\ 615.6 \text{ t/hm}^2$,

表5 2015—2018年大豆产量及其构成要素

Tab. 5 Soybean production and components in 2015—2018

年份	处理	单株荚数/荚	单株粒数/粒	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2015	C0	(31.33 ± 1.26) ^c	(80.33 ± 2.36) ^c	(18.39 ± 0.84) ^c	(2 150 ± 86) ^c
	C25	(38.67 ± 3.06) ^b	(94.33 ± 4.16) ^b	(20.54 ± 0.64) ^{ab}	(2 265 ± 91) ^{bc}
	C50	(39.33 ± 1.78) ^b	(98.33 ± 3.34) ^b	(20.64 ± 1.23) ^{ab}	(2 530 ± 123) ^b
	C75	(48.67 ± 3.56) ^a	(106.00 ± 2.12) ^a	(21.55 ± 1.06) ^a	(2 615 ± 123) ^a
	C100	(42.00 ± 2.00) ^b	(100.00 ± 1.89) ^{ab}	(19.97 ± 0.98) ^b	(2 590 ± 89) ^{ab}
2016	C0	(33.67 ± 1.43) ^c	(74.00 ± 1.23) ^c	(18.22 ± 0.56) ^c	(2 100 ± 102) ^c
	C25	(36.00 ± 2.06) ^{bc}	(91.33 ± 3.23) ^b	(21.72 ± 1.42) ^b	(2 630 ± 165) ^b
	C50	(41.33 ± 2.23) ^a	(100.33 ± 6.54) ^a	(23.29 ± 0.23) ^a	(2 800 ± 178) ^a
	C75	(41.00 ± 1.47) ^b	(95.00 ± 4.32) ^b	(20.53 ± 1.10) ^b	(2 520 ± 211) ^b
	C100	(37.67 ± 1.42) ^{bc}	(94.33 ± 3.65) ^b	(19.91 ± 0.89) ^{bc}	(2 445 ± 83) ^{bc}
2017	C0	(35.33 ± 2.05) ^c	(87.34 ± 3.06) ^c	(18.99 ± 0.17) ^c	(2 240 ± 106) ^c
	C25	(42.50 ± 1.12) ^b	(102.54 ± 5.12) ^b	(22.84 ± 1.06) ^b	(2 640 ± 69) ^{ab}
	C50	(46.67 ± 3.12) ^a	(110.20 ± 7.12) ^a	(24.03 ± 0.34) ^a	(2 780 ± 126) ^a
	C75	(40.80 ± 2.21) ^b	(98.22 ± 4.32) ^b	(20.71 ± 0.62) ^{bc}	(2 550 ± 114) ^b
	C100	(39.80 ± 2.89) ^b	(93.34 ± 3.12) ^{bc}	(20.34 ± 1.23) ^{bc}	(2 445 ± 143) ^b
2018	C0	(32.66 ± 1.67) ^c	(89.68 ± 3.45) ^c	(17.32 ± 1.23) ^c	(2 385 ± 123) ^c
	C25	(50.23 ± 1.45) ^a	(107.12 ± 4.63) ^a	(23.56 ± 0.84) ^a	(2 660 ± 146) ^a
	C50	(42.86 ± 4.21) ^b	(96.56 ± 7.89) ^b	(21.03 ± 1.94) ^b	(2 450 ± 128) ^b
	C75	(40.64 ± 1.53) ^b	(90.89 ± 6.56) ^{bc}	(18.67 ± 0.83) ^b	(2 390 ± 132) ^b
	C100	(31.76 ± 2.26) ^c	(88.34 ± 4.63) ^c	(16.69 ± 1.12) ^c	(2 112 ± 114) ^c

其他处理年产量从高到低依次为 C75 (2 545.75 t/hm²)、C25 (2 525.25 t/hm²)、C100 (2 398 t/hm²)、C0 (2 243.75 t/hm²)。SYI 与平均年产量的变化规律大致相同 (R^2 为 0.984 5, $P < 0.01$), 同时也在 C50 处理 SYI 最高, 为 0.871, 表明在大豆生产过程中, 施加 50 t/hm² 的生物炭大豆产量可持续性最高, C0 处理 SYI 最小, 产量可持续性最弱。图 3c 为大豆 SYI 与平均年产量之间的关系。由图 3c 可知, 大豆

SYI 与平均年产量呈极显著的正相关 (R^2 为 0.942 8, P 为 0.052 52), 表明大豆 SYI 值越大, 平均年产量越高, 由拟合公式可知, SYI 每增加 0.1 个单位, 平均年产量增加 317.77 t/hm²。由此可见, 生产实践中可通过施加土壤改良剂来提高年产量, 进而提高产量可持续性, 同时也说明了黑土区施加生物炭可以维持大豆产量可持续性。综上分析可知, 逐年施加 50 t/hm² 的生物炭大豆产量可持续性较高。

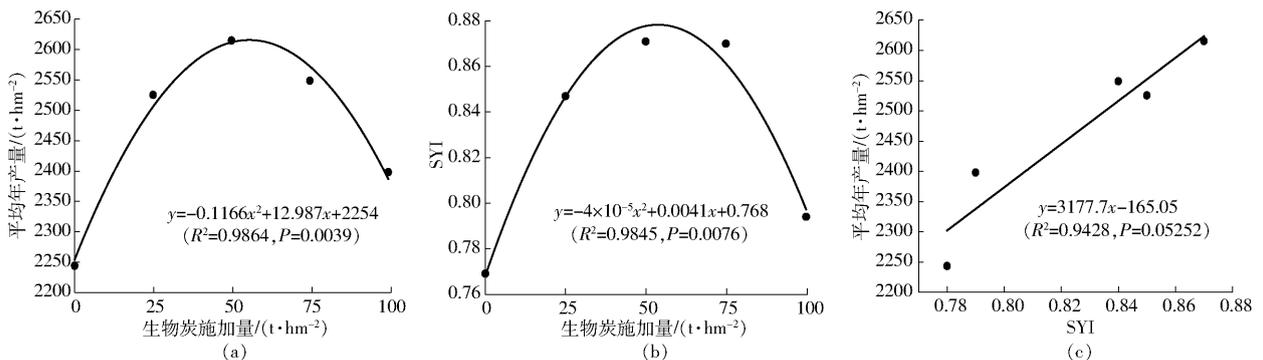


图3 大豆 SYI 与生物炭施加量及大豆平均年产量的关系

Fig. 3 Relationship between soybean SYI and average annual yield

3 讨论

土壤结构是调节土壤中水、肥、气、热的关键因素, 而且在土壤理化性质、水分运移中发挥重要的作用, 是作物生长的重要影响因素。研究表明, 土壤结构越强, 土壤抗侵蚀能力就越强, 土壤肥力和产量就越高^[27]。生物炭由于自身的结构特点, 施入土壤后

可改善土壤结构^[5]。在本研究中, 逐年施加生物炭土壤容重逐渐降低, 孔隙度逐渐升高, 这与李昌见等^[28]的研究结果一致。最适合大豆生长的土壤容重在 1.00 ~ 1.30 g/cm³ 之间, 孔隙度在 53% ~ 55% 之间^[29], 并不是容重越低, 对大豆生长就越好, 因为容重过低, 孔隙度过高, 土壤中水分蒸发较快, 大豆水分供应不足, 反而不利于生长。而适量的

生物炭可以使容重降低,孔隙度升高,有利于大豆生长。

土壤三相比是评价土壤水、肥、气、热相互关系的重要参数,是决定土壤的肥沃性与作物生长的关键。本试验结果显示,施加生物炭可降低土壤固相体积分数,提高气相体积分数;GSSI随施炭量的增加呈先增大后减小的变化趋势,STPSD呈先减小后增大趋势,在连续施加2年C50处理GSSI取得最大值,STPSD取得最小值,土壤三相比与理想三相比最接近,而C75、C100处理逐年施加土壤结构逐渐变差。这与魏永霞等^[13]、李晓龙等^[24]的研究结果一致。产生这种现象的原因是生物炭施加量过高,土壤中水分蒸发较快,土壤中气体增多,使土壤三相比偏离理想三相比;C75、C100逐年施加导致累积施炭量过高,导致土壤液相体积分数过低,气相体积分数过高,使土壤过于松散,土壤结构变差。

土壤团粒结构是土壤肥力的物质基础,是决定产量的内在因素。尚杰^[30]研究结果得出,施加生物炭可显著提高 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD,且在B0、B20、B40、B60、B80这5组处理中B60处理提高幅度最大。徐国鑫等^[31]认为单施生物炭可提高 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD。在本研究中,连续4年施加生物炭也可以得到类似结论,且在第2年C50处理提高最大。这与侯晓娜等^[32]认为的单施生物炭对MWD、GMD和 $R_{0.25}$ 无显著影响不同,这可能是因为生物炭施加量不同和土壤类型不同。

生物炭由于自身的理化性质,施入土壤后对土壤养分含量也有一定的影响。但施加生物炭对土壤养分含量的说法尚不一致。吕波等^[33]认为施加生物炭可增加土壤有效磷、速效钾以及有机质含量;李明等^[34]通过1年试验研究可知,施加生物炭后土壤速效磷含量逐渐升高,碱解氮、速效钾含量呈先升高后降低趋势,在C25处理取得最大值;吴昱等^[5]通过1年试验研究得出土壤有效磷、速效钾含量随生物炭施加量的增加呈线性递增趋势,碱解氮呈指数增长趋势。在本研究中,连续4年土壤碱解氮、速效磷含量随施炭量的增加呈先增加后减小的变化趋势,速效钾、有机质含量呈逐渐升高的趋势,且升高的速率逐渐变缓;C25处理连续施加3年土壤肥力提高效果最好,而2017、2018年C75、C100处理土壤碱解氮、有效磷含量低于对照处理。这是因为生物炭本身含有矿质养分和结构特性,施入土壤后可以在一定程度上补充土壤养分,但值得注意的是,当施炭量过高或累积施炭量过高导致碳氮比增多,引起氮和磷生物固定^[13],导致含量降低。

多数学者认为施加生物炭可以提高作物产量,

但在施加量和施用年限的合理分配上却存在许多说法。谢迎新等^[35]通过6季水稻研究得出,低施炭量仅提高1季小麦产量,对其他5季无明显效果,中施炭量则提高3季小麦产量,而高施炭量提高2季小麦产量;JONES等^[36]通过研究可知,连续2年施加生物炭对产量没有显著影响,却显著增加了第3年的产量;张娜等^[37]通过1年试验认为施加生物炭可提高玉米产量及其构成要素;在本试验中,通过连续4年施加生物炭的结果看出,在第2年C50处理对产量及其组成因素提高效果最好,C25、C50处理逐年施加可以提高大豆产量,C75、C100处理逐年施加产量降低,而2018年C100处理大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量和产量均低于对照处理。这是因为生物炭效应是有阈值的,当施炭量较低时,生物炭由于自身含碳量较高,给作物提供一定的养分,供作物生长发育,当施炭量较高时,土壤结构遭到破坏,反而不利于作物生长。另一方面,累积施炭量过高,破坏作物原有的养分平衡和生长条件,致使产量及其构成要素含量降低。

在产量可持续性能上,也有学者研究表示施加生物炭可以提高作物产量的可持续性^[20]。在本研究中,连续4年施加生物炭各处理SYI都高于C0处理,其中C50处理SYI最大,表明在大豆生产过程中,施加生物炭对大豆可持续性有一定的影响。因此本研究建议在确定最优施肥模式时,可以加入适量的生物炭,用以提高土壤肥力和产量,并且可以维持产量可持续性。然而,产量可持续性指数多用于评价水稻或玉米,对于大豆的研究还需要进一步探讨和改善。综上所述,连续3年以上施加生物炭,土壤 $R_{0.25}$ 、GMD、MWD、土壤养分含量和大豆产量均表现降低的趋势,因此,本研究建议连续2年施加 50 t/hm^2 的生物炭。另外,本研究仅用4年的时间研究生物炭对土壤结构、土壤肥力和作物产量的影响,对于更多年限的研究和生物炭的后效应还需进一步论证。

4 结论

(1)土壤容重随施炭量的增加逐渐降低,孔隙度逐渐升高,且作用时间越长,效果越明显。连续4年随着生物炭施用量的增加,土壤固相体积分数逐渐降低、气相体积分数逐渐升高,GSSI呈先增后减趋势,STPSD呈先减后增趋势,在第2年C50处理时GSSI最大、STPSD最小、三相比达到最优,即50.88:25.63:23.49。另外,C25、C50处理连续施加2年对土壤结构改善相对较好,而C75、C100处理逐年施加土壤结构逐渐变差。

(2)连续4年施加生物炭可以提高 $R_{0.25}$ 含量,各年最优处理较同年C0处理相比提高了78.13%、63.15%、70.65%、61.01%。连续4年平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)随施炭量的增加呈先增大后减小变化趋势,其中2016年C50处理MWD和GMD提高最大,为0.777、0.263 mm。连续2年施加50 t/hm²的生物炭对土壤稳定性的提升效果最优。

(3)施加生物炭可以提高土壤养分含量。连续4年土壤速效钾含量随施炭量的增加呈逐渐升高趋势。土壤碱解氮和有效磷含量随施炭量的增加呈先升高后降低的趋势,施加1、2年在C50处理升高到最大值,较C0处理分别升高46.1%、76.6%和

46.4%、85.4%,连续施加3、4年在C25处理提高到最大,分别较同年C0处理提高了33%、100.7%和23.9%、103.2%。C25、C50处理连续施加3年对土壤碱解氮、有效磷含量提高最大,对于C75、C100处理连续施加2年效果最好;土壤速效钾、有机质含量随施炭量的升高逐渐升高,且随着年限的增加,升高的速率变缓。

(4)连续施加2年50 t/hm²的生物炭对产量及其构成因素提高最大,同时可以维持高产稳产性,增产率为33.3%,SYI为0.871。逐年施加25 t/hm²的生物炭会使产量提高,逐年施加50 t/hm²的生物炭在第2年产量达到最大,而C75、C100处理逐年施加生物炭会使产量降低。

参 考 文 献

- [1] 鄂颖,熊毅雯. 浅谈秸秆还田的作用和要点[J]. 农业装备技术,2012,38(5):64.
E Ying, XIONG Yiwen. Talking about the function and key points of returning straw to field [J]. Agricultural Equipment Technology, 2012,38(5): 64. (in Chinese)
- [2] 刘慧,魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. 农业工程学报,2014,30(20):288-296.
LIU Hui, WEI Yongxia. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 288-296. (in Chinese)
- [3] 勾芒芒,屈忠义,王凡,等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):1-12.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):1-12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)
- [4] KOOKANA R S, SARMAH A K, VAN ZWIETEN L, et al. Biochar application to soil[J]. Advances in Agronomy,2011,112:103-143.
- [5] 吴昱,赵雨森,刘慧,等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):247-256.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):247-256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031. (in Chinese)
- [6] PICCOLO A, MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Annals of Laboratory Medicine,2014,34(6):426-432.
- [7] FORBE M S, RAISON R J, SKJEMSTED J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. Science of the Total Environment,2006,370(1):190-206.
- [8] ZU Xiang, LIU Xiaomin, CHEN Yanjing, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. CATENA,2014,123:45-51.
- [9] 陈心想,何绪生,耿增超,等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报,2013,33(20):6534-6542.
CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield[J]. Journal of Ecology,2013,33(20):6534-6542. (in Chinese)
- [10] 王月玲,耿增超,王强,等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学,2016,37(9):3634-3641.
WANG Yueling, GENG Zengchao, WANG Qiang, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. Environment Science,2016, 37(9):3634-3641. (in Chinese)
- [11] 朱秋丽,王纯,严锦华,等. 施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(4):191-197.
ZHU Qiuli, WANG Chun, YAN Jinhua, et al. Effects of straw and waste application on soil aggregates and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the jasmine garden [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,31(4):191-197. (in Chinese)
- [12] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学,2015,36(3):1045-

1052.

QIU Xiaolei, ZONG Lianggang, LIU Yifan, et al. Effects of different cultivation patterns on soil aggregates and organic carbon fractions[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):1045-1052. (in Chinese)

- [13] 魏永霞,张翼鹏,张雨凤,等.黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2):284-291,312.
WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2):284-291,312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [14] 刘菁华,米彩红,周丽丽,等.生物炭还田对融雪期棕壤有效养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(6):880-887.
LIU Qinghua, MI Caihong, ZHOU Lili, et al. Effect of biochar returning on brown soil available nutrient during snowmelt period[J]. *Northwest Agricultural Journal*, 2018, 27(6):880-887. (in Chinese)
- [15] 熊荟菁,张乃明,赵学通,等.秸秆生物炭对葡萄园土壤改良效应及葡萄品质的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4):936-941.
XIONG Huijing, ZHANG Naiming, ZHAO Xuetong, et al. Effects of straw biochar on soil improvement effects and grape quality in vineyards[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4):936-941. (in Chinese)
- [16] 吴昱,刘慧,杨爱峥,等.黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5):287-294.
WU Yu, LIU Hui, YANG Aizheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in sloping farm-land of black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):287-294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034. (in Chinese)
- [17] ALFREDI O, JAN M, VEGARD M, et al. Insitu effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:35-44.
- [18] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等.生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3):159-165.
YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(3):159-165. (in Chinese)
- [19] 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.
LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12):119-124. (in Chinese)
- [20] 姜慧敏,郭俊梅,刘晓,等.不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4):933-941.
JIANG Huimin, GUO Junxi, LIU Xiao, et al. Effects of combined application of nitrogen from different source on nitrogen utilization of spring maize and sustainability of soil fertility in Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4):933-941. (in Chinese)
- [21] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟.基于土壤三相的广义土壤结构的定量化表达[J]. *生态学报*, 2009, 29(4):2067-2072.
WANG Enzhen, ZHAO Yusen, CHEN Xiangwei. Quantitative of generalized soil structure based on soil three phase[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2067-2072. (in Chinese)
- [22] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等.废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8):3000-3008.
ZHU Qiuli, ZENG Dongping, WANG Chun, et al. Effects of waste applications on the distribution and stability of soil aggregates in the paddy field of Fuzhou plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8):3000-3008. (in Chinese)
- [23] 李忠芳,徐明岗,张会民,等.长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5):1264-1269.
LI Zhongfang, XU Minggang, ZHANG Huimin, et al. Sustainability of crop yield in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5):1264-1269. (in Chinese)
- [24] 李晓龙,高聚林,胡树平,等.不同深耕方式对土壤三相相比及玉米根系构型的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4):1-7,29.
LI Xiaolong, GAO Julin, HU Shuping, et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize [J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2015, 33(4):1-7,29. (in Chinese)
- [25] YAN F L, SHI Z H, LI Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of ultisols in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100:34-41.
- [26] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4790-4799.
GAO Hongjun, PENG Chang, ZHANG Xiuzhi, et al. Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in the northeast black soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4790-4799. (in Chinese)
- [27] SHINJO H, FUJITA H, GINTZBURGER G. Soil aggregate stability under different land scapes and vegetation types in a

- semiarid area in Northeastern Syria[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 229 – 240.
- [28] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2187 – 2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2187 – 2193. (in Chinese)
- [29] 曹立为. 耕层深度及土壤容重对大豆生长发育和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
CAO Liwei. Effects of topsoil depth and soil bulk density on soybean growth and yield [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [30] 尚杰. 添加生物炭对壤土理化性质和作物生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
SHANG Jie. Effect of adding biochar on the physical and chemical properties and crop growth in Lou soil [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [31] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355 – 362.
XU Guoxin, WANG Zifang, GAO Ming, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 39(1): 355 – 362. (in Chinese)
- [32] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705 – 712.
HOU Xiaona, LI Hui, ZHU Liubing, et al. Effects of biochar and straw addition on aggregate composition and organic carbon distribution in Shajiang black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 705 – 712. (in Chinese)
- [33] 吕波, 王宇函, 夏浩, 等. 不同改良剂对黄棕壤和红壤上白菜生长及土壤肥力影响的差异[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(22): 4306 – 4315.
LÜ Bo, WANG Yuhuan, XIA Hao, et al. Differences in effects of different amendments on growth and soil fertility of Chinese cabbage in yellow brown soil and red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(22): 4306 – 4315. (in Chinese)
- [34] 李明, 胡云, 黄修梅, 等. 生物炭对设施黄瓜根际土壤养分和菌群的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 172 – 178.
LI Ming, HU Yun, HUANG Xiumei, et al. Effect of biological biochar on nutrient and bacterial communities of rhizosphere soil of facility cucumber[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 172 – 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161123&journal_id=jesam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.023. (in Chinese)
- [35] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 115 – 123.
XIE Yingxin, LIU Yujuan, ZHANG Weina, et al. Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(14): 115 – 123. (in Chinese)
- [36] JONES D L, ROUSK J, EDWARDS J G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113 – 124.
- [37] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1569 – 1574.
ZHANG Na, LI Jia, LIU Xuehuan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1569 – 1574. (in Chinese)