

秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响

高鸣慧, 李娜*, 彭靖, 陈坤, 高天一, 韩晓日*

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室/
农业农村部东北玉米营养与施肥科学观测实验站, 辽宁沈阳 110866)

摘要: 【目的】比较长期秸秆和生物炭还田后土壤团聚体的变化与差异, 旨在探索棕壤适宜的改良方法。

【方法】在辽宁沈阳棕壤上连续进行了6年的田间定位微区试验, 种植制度为玉米连作, 试验共设6个处理: 不施肥(CK)、单施氮磷钾(NPK)、单施生物炭(B)、生物炭与氮磷钾配施(BNPK)、单施秸秆(S)、秸秆与氮磷钾配施(SNPK)。在玉米收获后, 采集0—20和20—40 cm两土层土壤样品, 采用Yoder湿筛法进行了团聚体分级和测定。【结果】与NPK相比, BNPK和SNPK处理显著提高了0—20和20—40 cm土层>1 mm、1~0.5 mm和0.25~0.5 mm粒级团聚体含量占比, 降低了0.25~0.053 mm粒级团聚体含量占比, SNPK处理提高大团聚体含量占比的效果显著高于BNPK。与NPK处理相比, BNPK和SNPK处理显著增加了团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和0.25 mm粒级团聚体含量($R_{0.25}$), 即增加了团聚体的稳定性, SNPK处理的团聚体MWD和GMD值又显著高于BNPK, $R_{0.25}$ 值两处理间无显著差异(0—20 cm土层)。随团聚体粒级减小, 不同粒级团聚体有机碳含量随之减少, 以>1 mm粒级团聚体有机碳含量最高。与CK相比, 各施肥处理均增加了各粒级团聚体有机碳含量, BNPK处理对0—20 cm土层0.25~0.053 mm粒级团聚体有机碳含量影响最显著, 有机碳含量增加了44.57%。【结论】长期秸秆和生物炭还田能够改变土壤团聚体的分布, 有利于大团聚体的形成和土壤结构改善, 可提高土壤团聚体有机碳含量和团聚体稳定性, 增加作物产量; 秸秆直接还田提高团聚体稳定性的效果优于生物炭还田, 生物炭还田提高团聚体有机碳的效果方面优于秸秆直接还田。

关键词: 棕壤; 秸秆; 生物炭; 田间定位试验; 土壤团聚体; 有机碳

Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil

GAO Ming-hui, LI Na*, PENG Jing, CHEN Kun, GAO Tian-yi, HAN Xiao-ri*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/Monitoring & Experimental Station of Corn Nutrition and Fertilization in Northeast Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objectives】The influence characteristics of straw returning and biochar application on different sizes of soil aggregate contents is closely related with their efficiencies in soil fertility improvement. The study aimed to clarify their differences and find suitable ways for the improvement of brown soil fertility. 【Methods】A field microplot experiment was conducted for six years under continuous single corn production in brown soil of Shenyang City, Liaoning Province. The experiment had six treatments, including: no fertilizer control (CK), chemical fertilizer (NPK), biochar application alone (B), biochar with chemical fertilizer application (BNPK), straw application alone (S) and straw with chemical fertilizer application (SNPK). After harvest each year, soil samples of 0–20 cm and 20–40 cm layers were collected, and soil aggregates were classified and the contents were determined using the method of Yoder. 【Results】Compared with NPK treatment, BNPK and SNPK

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-07-24

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFD0300308); 国家重点研发计划项目(2017YFD0300700)。

联系方式: 高鸣慧 E-mail: 15840091108@163.com

* 通信作者 李娜 E-mail: lnxlina@163.com; 韩晓日 E-mail: hanxiaori@163.com

treatments significantly increased the percentages of aggregate in size of > 1 mm, 1–0.5 mm and 0.25–0.5 mm in both 0–20 cm and 20–40 cm soil layers, decreased the percentage of aggregates of 0.25–0.053 mm, the increase effect of SNPK treatment was significantly higher than that of BNPK. Compared with NPK treatment, both BNPK and SNPK treatments increased MWD, GMD and $R_{0.25}$ significantly, the increase effects in MWD and GMD of SNPK were significantly higher than those of BNPK, those in $R_{0.25}$ of BNPK and SNPK treatments were not significantly different. The organic C contents decreased with the decrescent aggregate sizes, > 1 mm soil aggregate had the highest organic C content. Compared with CK, the five treatments increased the soil organic carbon contents in all sizes of aggregates. The BNPK treatment had the most significant impact on the organic carbon content of 0.25–0.053 mm aggregate in 0–20 cm soil layer, which was increased by 44.57%.

【 Conclusions 】 Long-term straw and biochar application could change the distribution of soil aggregates, promote the formation of macro-aggregate, improve soil structure, improve the content of soil organic carbon and the stability of soil aggregates and crop yield. The influence of straw retuning is better than biochar application in increasing soil aggregates stability, while biochar application performs better in increasing the organic carbon contents in the aggregates, especially in 0.25–0.053 mm size.

Key words: brown soil; straw; biochar; long-term field experiment; soil aggregates; organic carbon

棕壤是中国东北黑土区典型耕作土壤之一, 由于长期不合理耕作导致棕壤有机质含量逐年下降, 土壤结构破坏, 肥力退化等一系列问题发生^[1]。秸秆内含有大量有机质和植物生长所必需的氮、磷、钾及中微量元素^[2-3], 秸秆还田可有效提升土壤质量, 维持其可持续生产力^[4-5]。东北地区气候寒冷, 秸秆还田后不易腐解, 而将秸秆制备成生物炭, 生物炭施入土壤后可以通过对腐殖质及微域特征的影响促进碳素固定, 有利于增加土壤有机碳含量^[6-7]。生物炭能够吸附土壤有机分子, 通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成土壤有机质^[8]。生物炭施入土壤被认为有巨大的固碳增汇潜力, 已证实秸秆炭化还田能改善土壤理化性质和土壤结构, 提高作物产量和品质, 增强土壤“碳汇”功能和减少温室气体排放。土壤团聚体是土壤的基本结构单位, 其数量和质量决定土壤的性质和肥力^[9]。通过研究土壤结构和肥力的变化, 阐明秸秆和生物炭还田最佳方法对改变土壤团聚体分布和提升土壤肥力有重要意义。研究已经证明秸秆和生物炭还田可以显著增加土壤中大团聚体数量, 提高团聚体中有机碳含量^[10], 改善土壤结构, 进而使土壤肥力得到提高。乔丹丹等^[11]研究发现秸秆和生物炭还田后能增加大粒级土壤团聚体含量, 提升土壤团聚体稳定性, 提高土壤有机碳含量, 而徐国鑫等^[12]采用油菜/玉米轮作模式的田间试验发现, 生物炭还田和秸秆+生物炭还田效果优于秸秆还田, 大团聚体有机碳贡献率最低。林洪羽等^[13]研究表明, 秸秆和生物炭施用能显著提升紫色土有

机碳含量, 增强土壤结构稳定性, 同样在砂姜黑土上, 生物炭与秸秆配施可以增加土壤大团聚体含量和团聚体稳定性^[14]。Zhang 等^[15]则通过对东北地区软土水稳定性团聚体内有机碳的研究发现, 与对照和单施氮磷钾处理相比, 秸秆和生物炭配施氮磷钾肥处理增加 > 2 mm 粒级团聚体含量, 降低 0.25~0.053 mm 和 < 0.053 mm 粒级团聚体含量, 平均重量直径和有机碳含量也相对增加。综上表明秸秆和生物炭还田对改善土壤结构, 提高土壤团聚体稳定性和有机碳含量具有重要影响。以往的研究采用定位试验较少, 且多在原有施肥基础上添加秸秆和生物炭, 而未考虑秸秆和生物炭本身氮磷钾含量, 土壤对秸秆和生物炭还田后的响应是由于额外添加的养分, 还是秸秆和生物炭自身具有的良好理化性质而造成的积极影响, 相关研究仍然较少, 因此在等氮磷钾养分条件下, 秸秆和生物炭还田对土壤团聚体分布和团聚体有机碳含量的影响尚不明确。本研究基于连续 6 年定位微区试验, 通过对土壤团聚体的分布、稳定性、有机碳含量及有机碳贡献率的变化开展研究, 以期明确秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响, 为指导农业合理施肥和辽宁地区棕壤可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在辽宁省沈阳市沈阳农业大学后山棕壤肥料长期定位试验基地玉米渗滤池定位微区, 该地

区属温带湿润—半湿润季风气候, 平均气温 7.0℃~8.1℃, 年降水量 574~684 mm, 无霜期 147~164 天, 供试土壤为棕壤, 是东北地区主要耕作土壤之一, 具有典型代表性。本定位试验开始于 2013

年, 试验开始前耕层土壤有机质含量 10.01 g/kg、全氮 0.70 g/kg、全磷 0.32 g/kg、全钾 20.31 g/kg、碱解氮 55.60 mg/kg、速效磷 11.56 mg/kg、速效钾 79.28 mg/kg、pH 6.05。玉米秸秆和生物炭性状见表 1。

表 1 秸秆和生物炭性状
Table 1 The properties of straw and biochar

项目 Item	全氮 (%) N	全磷 (%) P ₂ O ₅	全钾 (%) K ₂ O	有机碳 (%) Organic C	比表面积 (m ² /g) BET surface area	孔体积 (cm ³ /g) Pore volume	孔径 (nm) Pore size	pH
秸秆 Straw	0.96	0.72	0.87	42.08				
生物炭 Biochar	1.25	0.88	2.70	41.99	26.92	0.04	7.12	10.06

试验设 6 个处理: 不施肥 (CK)、单施氮磷钾化肥 (NPK)、单施生物炭 (B)、生物炭与氮磷钾配施 (BNPK)、单施秸秆 (S)、秸秆与氮磷钾配施 (SNPK)。生物炭用量 (干基) 为 1500 kg/hm² (由 4500 kg/hm² 玉米秸秆制取); 秸秆用量 (干基) 为 4500 kg/hm² (依据当地实际秸秆年分解量); 处理 NPK、BNPK、SNPK 氮磷钾用量相同, 分别为 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 112.5 kg/hm²、K₂O 112.5 kg/hm² (含秸秆和生物炭中氮磷钾), 即等氮磷钾养分设计。秸秆 (切成 2~3 cm 段) 和生物炭每年春播前施用, 肥料作为基肥一次性全部与土壤混施, 深度为 0—20 cm, 后期不再追肥。种植制度为一年一熟玉米连作, 2013—2018 年品种为东单 6531, 种植密度为 60000 株/hm², 每个小区 12 株。小区面积为 2 m², 每个处理 3 次重复, 随机排列。

1.2 土壤样品采集

于 2018 年秋季收获后采集 0—20 和 20—40 cm 土层土壤, 沿自然结构面轻轻地用手掰成直径约为 1 cm 的小土块, 避免受到机械压力而破碎, 去除粗根和小石块, 过 10 mm 筛, 风干后待用。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤团聚体分级及有机碳测定 采用 Yoder 湿筛法^[16], 分离出 > 1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和 < 0.053 mm 粒级团聚体, 过 100 目筛后测定其中有机碳含量。利用德国 Vario EL III 型元素分析仪测定土壤有机碳含量。

1.3.2 土壤团聚体稳定性指标 选取平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和 0.25 mm 粒级团聚体含量 (R_{0.25}) 作为土壤团聚体稳定性的评价指标^[14]。其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i \right]$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{R>0.25}}{M_T}$$

式中: n 为粒径分组的组数; \bar{X}_i 为 i 粒级分组团聚体的平均直径; W_i 为 i 粒级团聚体的质量分数; M_T 为团聚体总质量 (g); $M_{R>0.25}$ 为 0.25 mm 粒级团聚体质量。

各粒级团聚体有机质对土壤总有机碳的贡献率按如下公式计算:

各粒级团聚体有机碳贡献率 (%) = (各粒级团聚体有机碳含量 × 各粒级团聚体含量 × 100) / 耕层土壤总有机碳含量

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2010 进行试验基础数据处理, 用 SPSS 22.0 对土壤速效养分含量、团聚体分布及其稳定性、土壤有机碳含量、团聚体有机碳含量及其贡献率、玉米产量等数据进行单因素方差分析和显著性检验, 处理间差异显著性采用 Duncan 多重比较方法进行检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤速效养分

如表 2 所示, 不同施肥处理均较 CK 处理显著提高土壤碱解氮和速效磷含量。0—20 cm 土层, 与 NPK 处理相比, BNPK 和 SNPK 处理土壤碱解氮含量均显著降低; BNPK 处理速效磷含量没有显著增加, SNPK 处理显著提高了 12.29% ($P < 0.05$), 但 BNPK 处理与 SNPK 处理无显著差异; 土壤速效钾含量所有处理间没有显著差异。20—40 cm 土层, BNPK 和 SNPK 处理碱解氮含量与 NPK 处理没有显

表 2 不同处理土壤速效养分含量 (mg/kg)

Table 2 Soil available nutrient contents under different treatments

处理 Treatment	碱解氮 Available N		速效磷 Available P		速效钾 Available K	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
CK	44.00 ± 1.45 c	30.30 ± 0.91 c	14.82 ± 0.64 d	12.02 ± 0.56 e	153.07 ± 4.81 b	128.20 ± 1.10 d
NPK	83.46 ± 1.77 a	39.44 ± 1.87 a	29.20 ± 1.20 b	25.10 ± 0.33 a	170.30 ± 6.16 a	135.67 ± 0.39 bc
B	74.12 ± 1.16 b	36.32 ± 1.65 ab	15.40 ± 0.75 d	15.90 ± 0.47 c	167.13 ± 2.76 a	121.20 ± 2.32 e
BNPK	76.40 ± 1.45 b	37.15 ± 1.46 ab	30.20 ± 1.28 ab	14.03 ± 0.71 d	176.27 ± 3.12 a	139.80 ± 1.10 b
S	72.45 ± 3.30 b	35.28 ± 1.45 b	21.00 ± 0.76 c	17.77 ± 0.54 b	169.10 ± 2.22 a	132.07 ± 3.99 cd
SNPK	74.12 ± 1.36 b	37.36 ± 0.75 ab	32.79 ± 0.56 a	15.47 ± 0.38 cd	180.53 ± 5.69 a	153.17 ± 1.58 a

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 同列数据后不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

著差异, 其含量整体小于 0—20 cm 土层土壤碱解氮含量; 速效磷含量显著低于 NPK 处理, SNPK 处理速效钾含量显著高于 BNPK 处理, BNPK 与 NPK 处理差异不显著。总体上, 生物炭配合氮磷钾处理降低了土壤中速效氮含量, 增加了速效磷含量, 对速效钾含量没有显著影响, 而秸秆与氮磷钾配合也降低了土壤速效氮含量, 但增加了土壤表层 (0—20 cm) 速效磷和亚表层 (20—40 cm) 速效钾含量。

2.2 土壤团聚体

由表 3 可知, 与 NPK 处理相比, 0—20 cm 土层中, BNPK 显著增加了 > 1 mm、1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒级团聚体占比, 减少了 0.25~0.053 mm 粒级团聚体占比, < 0.053 mm 粒级团聚体占比无显著变化; SNPK 处理显著增加了 > 1 mm 和 1~0.5 mm 粒级团聚体占比, 减少了 0.25~0.053 mm 粒级团聚体占比; 20—40 cm 土层中, BNPK 与 SNPK

表 3 不同处理土壤团聚体分布 (%)

Table 3 Distribution of soil aggregates under different treatments

土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment	团聚体粒级 Aggregates size (mm)				
		>1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.053	<0.053
0—20	CK	8.80 ± 0.28 d	9.65 ± 0.43 b	10.54 ± 0.27 c	50.99 ± 0.42 a	20.02 ± 0.53 c
	NPK	9.09 ± 0.32 cd	9.33 ± 0.29 b	11.99 ± 0.22 b	49.68 ± 1.66 a	19.92 ± 0.98 c
	B	9.93 ± 0.31 c	9.90 ± 0.27 b	10.46 ± 0.18 c	41.16 ± 1.15 b	28.56 ± 0.77 a
	BNPK	11.96 ± 0.39 b	11.31 ± 0.30 a	13.12 ± 0.35 a	41.77 ± 1.37 b	21.84 ± 0.93 c
	S	11.49 ± 0.36 b	11.75 ± 0.59 a	11.51 ± 0.18 b	40.62 ± 1.05 b	24.64 ± 0.67 b
	SNPK	13.66 ± 0.33 a	11.47 ± 0.48 a	11.44 ± 0.36 b	42.91 ± 0.14 b	20.51 ± 0.41 c
20—40	CK	6.96 ± 0.14 e	7.79 ± 0.38 b	8.62 ± 0.16 c	49.39 ± 0.80 a	27.24 ± 0.97 b
	NPK	7.53 ± 0.37 de	7.64 ± 0.03 b	8.88 ± 0.37 c	49.33 ± 0.77 a	26.61 ± 0.83 b
	B	8.49 ± 0.17 c	8.39 ± 0.10 b	9.09 ± 0.33 bc	42.86 ± 0.96 c	31.17 ± 0.95 a
	BNPK	10.98 ± 0.15 b	8.32 ± 0.23 b	10.29 ± 0.42 a	46.90 ± 1.44 ab	23.51 ± 1.05 c
	S	7.92 ± 0.39 cd	7.65 ± 0.20 b	8.58 ± 0.17 c	44.00 ± 0.88 bc	31.84 ± 0.90 a
	SNPK	15.38 ± 0.36 a	11.20 ± 0.27 a	9.93 ± 0.30 ab	41.94 ± 1.16 c	21.55 ± 0.71 c

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 同列数据后不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

处理对土壤团聚体分布的影响效果相似, 增加 > 1 mm、1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒级团聚体占比, 减少 0.25~0.053 mm 和 < 0.053 mm 粒级团聚体占比。

两个土层中, SNPK 处理 > 1 mm 和 1~0.5 mm 粒级团聚体占比高于 BNPK 处理, BNPK 处理的 0.5~0.25 mm 粒级团聚体占比大于 SNPK 处理, 表明 SNPK 处理提高大粒级团聚体占比的效果好于 BNPK 处理。

由表 4 可知, 与 NPK 处理相比, BNPK 处理和 SNPK 处理显著增加 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$, 且 SNPK

处理 MWD、GMD 显著高于 BNPK 处理, $R_{0.25}$ 差异不显著(0—20 cm 土层)。0—20 cm 土层中, 团聚体 MWD 大小依次为 SNPK > BNPK > S > B = NPK > CK。与 NPK 处理相比, BNPK 处理和 SNPK 处理 MWD 分别提高了 15.79% 和 23.68%。与 NPK 处理相比, BNPK 处理和 SNPK 处理 GMD 分别增加 5.56% 和 11.11%。20—40 cm 土层中, BNPK 处理与 SNPK 处理 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 差异均显著, 且 SNPK 处理显著高于 BNPK 处理。

表 4 不同处理土壤团聚体稳定性差异

Table 4 Differences in stability of soil aggregates under different treatments

处理 Treatment	平均重量直径 MWD (mm)		几何平均直径 GMD (mm)		0.25 mm 粒级团聚体含量 $R_{0.25}$ (%)	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
CK	0.37 ± 0.02 c	0.31 ± 0.01 d	0.17 ± 0.02 c	0.14 ± 0.03 cd	28.99 ± 0.44 b	23.37 ± 0.18 d
NPK	0.38 ± 0.07 c	0.32 ± 0.06 cd	0.18 ± 0.02 c	0.14 ± 0.02 c	30.40 ± 0.79 b	24.05 ± 0.06 d
B	0.38 ± 0.07 c	0.34 ± 0.04 c	0.15 ± 0.03 d	0.14 ± 0.03 cd	30.29 ± 0.65 b	25.97 ± 0.15 c
BNPK	0.44 ± 0.05 b	0.40 ± 0.05 b	0.19 ± 0.02 b	0.17 ± 0.03 b	36.40 ± 0.45 a	29.59 ± 0.59 b
S	0.43 ± 0.09 b	0.32 ± 0.08 cd	0.18 ± 0.04 c	0.13 ± 0.03 d	34.74 ± 0.75 a	24.16 ± 0.45 d
SNPK	0.47 ± 0.03 a	0.50 ± 0.06 a	0.20 ± 0.02 a	0.20 ± 0.02 a	36.58 ± 0.50 a	36.51 ± 0.69 a

注 (Note): MWD—Mean weight diameter; GMD—Geometric mean diameter. CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 同列数据后不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

2.3 土壤及团聚体中有机碳含量

如图 1 所示, 经过 6 年定位试验, BNPK 处理和 SNPK 处理较 NPK 处理均能增加土壤有机碳含量(0—20 cm 土层)。0—20 cm 土层中, BNPK 处理土壤有机碳含量最高, 较 NPK 处理显著提高了 25.67%, 且 BNPK 处理土壤有机碳含量显著高于 SNPK 处理。20—40 cm 土层中, BNPK 处理和 SNPK 处理差异不显著, 但均高于 NPK 处理。

表 5 表明, 0—20 cm 土层中, 与 NPK 处理相比, BNPK 处理显著增加了各粒级团聚体中的有机碳含量, 而 SNPK 处理则显著增加了 > 1 mm、1~0.5 mm 和 < 0.053 mm 团聚体中的有机碳含量。20—40 cm 土层中, 与 NPK 处理相比, BNPK 处理显著增加了 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中的有机碳含量, 而 SNPK 处理则显著增加 1~0.5 mm、0.25~0.053 mm、< 0.053 mm 粒级团聚体中的有机碳含量。综合来看, 生物炭与 NPK 配合提高表层(0—20 cm)土壤中各粒级团聚体中有机碳含量的效果显著, 与 CK 相比有机碳含量增加了 52.89%。而秸秆与

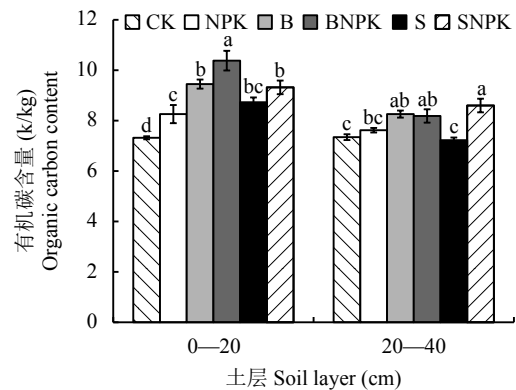


图 1 不同处理各土层土壤有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content in each soil layer under different treatments

[注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 柱上不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

表 5 不同施肥处理各粒级团聚体中有机碳含量

Table 5 Organic carbon contents of soil aggregates at all sizes under different treatments

土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment	团聚体有机碳含量 Organic carbon content in aggregates (g/kg)				
		>1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	CK	8.49 ± 0.27 c	7.58 ± 0.11 d	7.22 ± 0.21 d	7.27 ± 0.22 c	6.07 ± 0.11 c
	NPK	9.32 ± 0.34 c	8.22 ± 0.20 c	8.79 ± 0.21 b	8.09 ± 0.22 bc	6.88 ± 0.07 b
	B	10.63 ± 0.25 b	9.31 ± 0.19 b	9.76 ± 0.19 a	10.44 ± 0.36 a	7.12 ± 0.31 b
	BNPK	12.98 ± 0.33 a	10.46 ± 0.13 a	9.97 ± 0.22 a	10.51 ± 0.29 a	7.97 ± 0.18 a
	S	9.22 ± 0.30 c	7.75 ± 0.09 d	7.98 ± 0.08 c	8.69 ± 0.40 b	7.44 ± 0.18 ab
	SNPK	11.59 ± 0.51 b	9.50 ± 0.15 b	8.78 ± 0.15 b	8.95 ± 0.35 b	7.77 ± 0.19 a
20—40	CK	8.86 ± 0.14 bc	8.27 ± 0.15 bc	7.44 ± 0.18 bc	6.61 ± 0.12 c	5.59 ± 0.18 b
	NPK	9.46 ± 0.32 ab	7.99 ± 0.29 bc	8.03 ± 0.29 ab	7.13 ± 0.24 bc	5.49 ± 0.29 b
	B	9.68 ± 0.20 a	8.73 ± 0.18 b	8.42 ± 0.27 a	8.48 ± 0.31 a	6.00 ± 0.11 b
	BNPK	9.04 ± 0.18 abc	8.84 ± 0.42 b	8.61 ± 0.21 a	8.23 ± 0.28 a	6.23 ± 0.18 b
	S	8.09 ± 0.16 d	7.81 ± 0.20 c	6.95 ± 0.13 c	7.44 ± 0.30 b	5.85 ± 0.24 b
	SNPK	8.45 ± 0.22 cd	10.45 ± 0.22 a	8.45 ± 0.09 a	8.70 ± 0.18 a	7.02 ± 0.27 a

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 同列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments for the same soil layer ($P < 0.05$).

NPK 配合可以显著提高亚表层 (20—40 cm) 某些团聚体中的有机碳含量。

在 0—20 cm 土层, 不同施肥处理 > 1 mm 粒级中团聚体有机碳贡献率大小依次为 SNPK > BNPK > S > B > NPK > CK, 而在 0.25~0.053 mm 粒级中有机碳贡献率大小依次为 CK > NPK > B > BNPK > S > SNPK。与 NPK 处理相比, BNPK 处理和 SNPK 处理可以显著提高 > 1 mm 粒级团聚体中有机碳贡献率, 分别提高了 45.29% 和 65.37%。20—40 cm 土层, 与 NPK 处理相比, BNPK 处理和 SNPK 处理能够明显提高 > 1 mm 粒级中团聚体有机碳贡献率, 分别提高了 23.23% 和 51.08%, 降低 < 0.053 mm 粒级中有机碳贡献率, 分别降低了 11.35% 和 14.37% (图 2)。

2.4 玉米产量

除 B 处理外, 不同施肥处理均可以显著增加玉米产量。玉米产量从高到低依次为 BNPK > SNPK > NPK > S > CK > B。BNPK 处理和 SNPK 处理较 NPK 处理产量分别增加了 22.20% 和 5.94%。其中 BNPK 处理增产效果最显著, 产量为 12102 kg/hm², 其次为 SNPK 处理, 产量为 10491 kg/hm², 且 BNPK 处理显著高于 SNPK 处理, BNPK 处理和 SNPK 处理显著高于 CK (图 3)。

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤速效养分和各粒级团聚体含量分布的影响

土壤中的氮磷钾等速效养分是植物当季可以直接吸收并利用的养分, 直接影响作物生长发育状况。慕平等^[17]通过连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状的影响研究, 发现多年秸秆还田可以有效提高土壤中有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。本研究结果与其一致。研究表明, 秸秆覆盖、粉碎翻埋、促腐或者炭化后还田配施常规用量化肥均增加作物产量, 长期还田能够增加土壤有机质和养分含量, 改善土壤理化性质^[18]。6 年的定位试验结果表明, 不同施肥处理对团聚体产生的影响不同。与单施氮磷钾相比, 秸秆配施氮磷钾能增加土壤 > 1 mm 和 1~0.5 mm 粒级团聚体含量, 减少 0.25~0.053 mm 团聚体含量。大团聚体含量增加主要是由于秸秆还田后增加土壤有机质含量, 同时降低了土壤容重, 使孔隙度增加, 增强根系及土壤微生物的活动能力, 有助于团聚体的形成^[19-20]。MWD、GMD 和 R_{0.25} 常作为反映土壤团聚体大小分布状况的指标, 且与土壤团聚体稳定性具有一致性, 其值越大, 大团聚体含量越高, 团聚体越稳定^[21]。连续秸秆还田能提高不同粒级土壤团聚体稳定性^[22], 本研究发

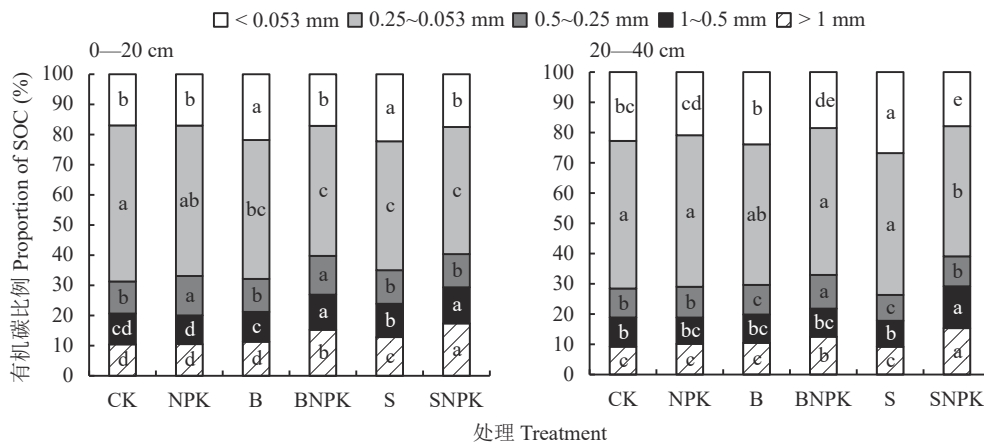


图 2 不同处理各粒级团聚体中有机碳贡献率

Fig. 2 Organic carbon proportion in different sizes of soil aggregates under different treatments

[注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—单施氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 柱内不同小写字母表示同一粒级团聚体中有机碳占比在不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$) Different lowercase letters inside the bars indicate the organic carbon proportion are significantly different among treatments for the same aggregate size ($P < 0.05$).]

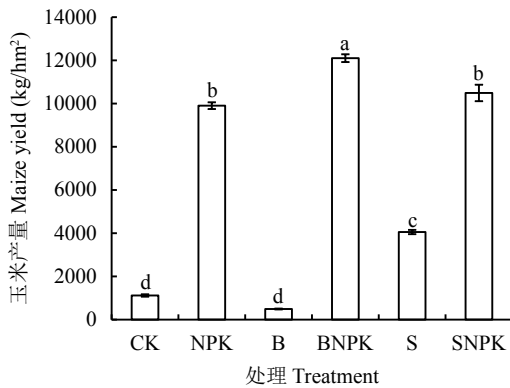


图 3 不同处理玉米产量

Fig. 3 Maize yield of different treatments

[注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer control, NPK—氮磷钾化肥 Chemical fertilizer, B—单施生物炭 Biochar application alone, BNPK—生物炭与氮磷钾配施 Biochar with chemical fertilizer application, S—单施秸秆 Straw application alone, SNPK—秸秆与氮磷钾配施 Straw with chemical fertilizer application. 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

现, 团聚体稳定性顺序为秸秆配施氮磷钾 > 单施氮磷钾 > 对照, 秸秆配施氮磷钾 $R_{0.25}$ 显著高于对照, 这是由于秸秆还田后可以分解产生如多糖、蛋白质、木质素等不同种类的有机质, 这些有机胶结物质对大团聚体的形成产生了影响^[23], 大团聚体含量增加, 进而增加团聚体稳定性。土壤有机碳是形成土壤团聚体重要的有机胶结物质, 且土壤团聚体的形成过程也是有机碳重要的固定过程。一方面, 有机

碳作为形成团聚体的重要胶结物质, 有利于土壤中矿物和黏粒胶结形成水稳定性大团聚体, 另一方面, 土壤有机碳是土壤肥力高低的决定性因子^[9], 而团聚体是土壤有机碳的重要储存场所。孟祥天等^[24]研究发现, 秸秆配施氮磷钾提高团聚体有机碳含量与对照和单施氮磷钾无显著差异, 而本试验发现秸秆配施氮磷钾可以显著增加不同粒级团聚体有机碳含量, 且大团聚体对土壤有机碳贡献率较大^[25], 这可能与研究的土壤类型不同有关。土壤团聚体有机碳的贡献率由团聚体分布和团聚体各粒级有机碳含量共同决定。

3.2 生物炭还田对土壤速效养分、团聚体的影响

在本试验中, 施用生物炭可以提高土壤有效磷和速效钾的养分含量。王冲等^[26]研究发现长期生物炭还田能提高黑土 0—20 cm 耕层的碱解氮、有效磷和速效钾含量, 提高黑土肥力。生物炭配施氮磷钾增产效果优于秸秆配施氮磷钾, 单施化肥对作物增产有一定的效果, 但不是最优处理。Ma 等^[27]通过 3 年微区试验研究表明秸秆和生物炭还田, 尤其是生物炭还田显著增加了软土中大团聚体含量, 本试验研究结果与其一致。与对照和氮磷钾处理相比, 生物炭配施氮磷钾能增加土壤大团聚体含量, 减少微团聚体 (< 0.25 mm) 含量。这是由于生物炭同样作为胶结介质促进土壤团聚体的形成, 且生物炭和土壤中其他形态有机物质以及矿物等可发生进一步的交互作用而促进土壤团聚体的形成^[28]。团聚体稳定性方

面, 秸秆配施氮磷钾 > 生物炭配施氮磷钾 > 单施氮磷钾 > 对照。究其原因, 生物炭本身作为胶结物质能将较小粒级的团聚体胶结成大团聚体, 促进团聚体形成^[29-30], 然而与秸秆不同, 生物炭是在高温条件下制备, 属惰性固体材料, 具有高度羧酸酯化和稳定的芳香化结构, 较秸秆难以被微生物分解利用^[31]。在提高团聚体稳定性方面, 秸秆还田效果优于生物炭还田。本研究发现, 在 0—20 cm 土层, 生物炭配施氮磷钾不同粒级 (除 < 0.053 mm 粒级) 团聚体有机碳含量显著高于秸秆配施氮磷钾, 原因可能是生物炭还田后提高土壤总碳库能力高于秸秆还田, 因此进入各粒级团聚体中的有机碳也较多。同时, 生物炭施用增加土壤大团聚体 (> 0.25 mm) 中有机碳含量, 这是因为新进入的外源有机碳主要分布在大团聚体中^[11], 与微团聚体 (< 0.25 mm) 相比, 生物炭更倾向与土壤大团聚体结合。土壤大团聚体内有机碳含量的增加, 有利于维持形成大团聚体的微团聚体的长期稳定。在提高团聚体有机碳含量上, 生物炭还田优于秸秆还田。生物炭配施氮磷钾对土壤团聚体有机碳贡献率影响与秸秆配施氮磷钾影响相同。在 0—20 cm 土层, 生物炭配施氮磷钾显著提高了土壤大团聚体的有机碳贡献率, 同时降低了土壤微团聚体的有机碳贡献率, 与徐国鑫^[12]研究结果相同。由于本定位试验开展时间相对较短, 因此仍需长期试验来进一步验证秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量影响, 为东北地区棕壤的改良、培肥提供更科学有力的实践依据。

4 结论

经过 6 年微区定位试验发现, 与单施 NPK 相比, 生物炭配施氮磷钾处理降低土壤速效氮含量, 而秸秆配施氮磷钾处理在降低土壤速效氮含量的同时提高土壤亚表层速效钾含量; 秸秆和生物炭还田均能改变土壤团聚体的分布, 促进土壤大团聚体 (> 0.25 mm) 形成, 提高团聚体稳定性; 有利于各粒级团聚体有机碳含量及有机碳贡献率的增加, 秸秆直接还田提高团聚体稳定性的效果优于生物炭还田, 生物炭还田提高土壤团聚体有机碳含量效果优于秸秆直接还田。在农业生产实践中可以通过秸秆和生物炭还田改善棕壤结构及提高其有机碳水平。

参 考 文 献:

[1] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 263–269.

Hao X X, Yang C B, Yuan Y R, *et al.* Effects of continuous straw returning on organic carbon content in aggregates and fertility of black soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 263–269.

[2] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 743–752.

Zhang H, Lü J L, Cao Y F, *et al.* Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 743–752.

[3] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 374–380.

Li F Y, Sun X F, Feng W Q, *et al.* Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 374–380.

[4] 田慎重, 郭洪海, 董晓霞, 等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 39–45.

Tian S Z, Guo H H, Dong X X, *et al.* Effect of tillage method change and straw return on soil labile organic carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 39–45.

[5] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1–21.

Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1–21.

[6] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1795–1799.

Hua L, Jin S S, Luo J J. Effect of Bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11): 1795–1799.

[7] Chen W F, Meng J, Han X R, *et al.* Past, present, and future of biochar[J]. *Biochar*, 2019, 1: 72–84.

[8] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41: 206–213.

[9] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 434–438.

Wen Q, Guan X. Progress in the study on soil aggregate formation[J]. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4): 434–438.

[10] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 929–939.

Wang F H, Huang R, Gao M, *et al.* Effect of combined application of biochar and straw on organic matter content in purple soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 929–939.

[11] 乔丹丹, 吴名宇, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (3): 92–99.

Qiao D D, Wu M Y, Zhang Q, *et al.* Effect of biochar and straw with chemical fertilizers on soil aggregate distribution and organic matter content in yellow cinnamon soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (3): 92–99.

[12] 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 G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental*

- Science, 2018, 39(1): 355–362.
- [13] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 96–103.
Lin H Y, Zhou M H, Zhang B W, *et al.* Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2020, 28(1): 96–103.
- [14] 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 X N, Li H, Zhu L B, *et al.* Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic matter distribution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 705–712.
- [15] Zhang J J, Wei Y X, Liu J Z, *et al.* Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a Mollisol in Northeast China: A five-year field experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 190: 1–9.
- [16] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28: 337–351.
- [17] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81–85.
Mu P, Zhang E H, Wang H N, *et al.* Effects of continuous returning straw to maize tillth soil on chemical character and microbial biomass[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 81–85.
- [18] Sadaf J, Shah G A, Shahzad K, *et al.* Improvement in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers[J]. Science of the Total Environment, 2017, 715: 607–608.
- [19] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513–1520.
Zhang P, Jia Z K, Wang W, *et al.* Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1513–1520.
- [20] 赵继浩, 李颖, 钱必长, 等. 秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 272–280, 287.
Zhao J H, Li Y, Qian B Z, *et al.* Effects of straw return and tillage on soil properties and yield of multi-cropping peanut after wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 272–280, 287.
- [21] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物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.
An Y, Ji Q, Zhao S X, *et al.* Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 293–300.
- [22] 窦莉洋. 秸秆还田对不同类型土壤团聚体稳定性、有机碳含量及其分布的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2018.
Dou L Y. Effects of straw return to field on stability, organic carbon content and distribution of different types of soil aggregates[D]. Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2018.
- [23] Sodhi G P, Berl V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009, (103): 412–418.
- [24] 孟祥天, 蒋瑀霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 326–332.
Meng X T, Jiang Y Q, Wang X Y, *et al.* Effects of long-term application of biochar and straws on red soil aggregate composition and organic matter distribution[J]. Soils, 2018, 50(2): 326–332.
- [25] 卢凌霄, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1167–1174.
Lu L X, Song T Q, Peng W X, *et al.* Profile distribution of soil aggregates organic carbon in primary forests in Karst cluster-peak depression region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1167–1174.
- [26] 王冲, 王玉峰, 谷学佳, 等. 连续施用生物炭对黑土基础理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 428–434.
Wang C, Wang Y F, Gu X J, *et al.* Effects of continuous application of biochar on the basic physicochemical properties of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2): 428–434.
- [27] Ma N N, Zhang L L, Zhang Y L, *et al.* Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application[J]. PLoS ONE, 2016, 18(5): e0154091.
- [28] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 539–546.
- [29] 姬强. 不同耕作措施和外源碳输入对土壤结构和有机碳库的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2016.
Ji Q. Effects of different tillage measures and external carbon inputs on soil structure and organic matter pools[D]. Yangling, Shannxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2016.
- [30] Deneff K, Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(4): 469–479.
- [31] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其CO₂释放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 93–99.
Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, *et al.* Effects of rice straw biochar on soil organic matter and CO₂ release in farmland[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 93–99.