

生物炭配合深松对土壤团聚体及有机碳的影响

张雨萌^{1,3}, 郭艳杰^{1,2}, 张丽娟^{1,2}, 刘婷^{1,3}, 吉艳芝^{1,2}

(1.河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2.河北省农田生态环境
重点实验室, 河北 保定 071000; 3.河北农业大学 邸洪杰土壤与环境实验室, 河北 保定 071000)

摘要: [目的] 分析施加生物炭配合深松对农田耕层土壤容重、土壤结构稳定性及有机碳的影响, 为土壤结构改良提供科学合理的调控措施和理论依据。[方法] 基于冬小麦—夏玉米轮作体系, 2017—2019 年大田试验期间, 在小麦季设置生物炭施用量分别为 0, 3 000, 6 000 kg/hm² (B₀, B₁ 和 B₂) 的 3 个处理, 在玉米季设置传统贴茬播种 (P) 和深松耕作播种 (S) 2 个耕作处理, 共计 B₀P, B₁P, B₂P, B₀S, B₁S, B₂S 6 个处理。[结果] ①两个轮作后, 相同耕作方式下, 土壤容重随生物炭用量的增加而降低, 其中 B₂S 较 B₀S 显著降低 (13.59%); 同一施炭水平下, 各处理土壤容重呈现出深松 < 传统的特征, 深松容重整体较传统低 4.95%。②连续施加生物炭配合深松耕作两年后, B₂S 处理下的有机碳含量达到最高, 比 B₀P 显著增加 (42.15%), 比 B₂P 增加 1.03%。③两个轮作后, 随生物炭用量的增加机械性团聚体含量 (DR_{0.25})、水稳性团聚体含量 (WR_{0.25})、平均重量直径 (MWD) 呈上升趋势, 相反土壤团聚体破坏率 (PAD) 及土壤不稳定团粒指数 (ELT) 呈逐渐下降趋势, 且表现为 B₂S 处理均优于其他各处理的特征, 表明高添加量生物炭配合深松耕作较传统耕作能更有效地提高团聚体稳定性。[结论] 小麦季基施 6 000 kg/hm² 生物炭并配合玉米季深松有利于提高土壤团聚体稳定性, 改善华北平原农田土壤结构。

关键词: 生物炭; 团聚体; 有机碳; 土壤容重; 小麦—玉米

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0368-08

中图分类号: S158.3

文献参数: 张雨萌, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 生物炭配合深松对土壤团聚体及有机碳的影响 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 368-375. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220523.001; Zhang Yumeng, Guo Yanjie, Zhang Lijuan, et al. Effects of biochar combined with subsoiling on soil aggregates and organic carbon [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 368-375.

Effects of Biochar Combined with Subsoiling on Soil Aggregates and Organic Carbon

Zhang Yumeng^{1,3}, Guo Yanjie^{1,2}, Zhang Lijuan^{1,2}, Liu Ting^{1,3}, Ji Yanzhi^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 2.Hebei Key Laboratory of Farmland Ecological Environment, Baoding, Hebei 071000, China; 3.Di Hongjie Soil and Environment Laboratory, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] The effects of applying biochar combined with subsoiling on soil bulk density, soil structure stability, and organic carbon in farmland topsoil were comprehensively analyzed to provide scientific and reasonable control measures and a theoretical basis for soil structure improvement. [Methods] A field experiment was conducted from 2017 to 2019 based on a winter wheat and summer corn rotation system. Biochar was applied at rates of 0, 3 000, and 6 000 kg/hm² (B₀, B₁, and B₂) during the wheat season in conjunction with two tillage treatments [traditional stubble sowing (P) and subsoiling tillage sowing (S)] imposed during the corn season to produce a total of six combined treatments of B₀P, B₁P, B₂P, B₀S, B₁S, and B₂S. [Results] ① After two crop rotations, under the same tillage method, soil bulk density decreased with increasing biochar application rate, and bulk density under B₂S was significantly lower than under B₀S

收稿日期: 2022-01-05

修回日期: 2022-03-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄淮海北部小麦—玉米农田耕层调理与土壤肥力提高关键技术”(2017YFD0300905)

第一作者: 张雨萌 (1996—), 女 (汉族), 河北省保定市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力提升。Email: 954180401@qq.com。

通信作者: 吉艳芝 (1975—), 女 (汉族), 河北省衡水市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤环境质量与养分循环研究。Email: jiyanzhi@hebau.edu.cn。

by 13.59%. Under the same biochar application level, soil bulk density under subsoiling was less than under traditional stubble sowing, and the subsoiling bulk density was 4.95% lower than the bulk density under traditional stubble sowing; ② After two years of continuous application of biochar combined with subsoiling tillage, the organic carbon content of B₂S was the highest, and was 42.15% greater than observed for B₀P and 1.03% greater than observed for B₂P; ③ After two crop rotations, the mechanical aggregate content (DR_{0.25}), the water-stable aggregate content (WR_{0.25}), and the mean weight diameter (MWD) showed an upward trend with increasing biochar application rate. In contrast, soil aggregate destruction rate (PAD) and soil unstable aggregate index (ELT) showed a decreasing trend, and B₂S produced better results than the other treatments, indicating that high biochar application rates combined with subsoiling tillage more effectively improved aggregate stability than traditional tillage. [Conclusion] A basic application of 6 000 kg/hm² of biochar during the wheat season combined with corn season subsoiling could improve the stability of soil aggregates and the soil structure of farmland in the North China Plain.

Keywords: biochar; aggregates; organic carbon; soil bulk density; wheat-corn

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,在调节土壤肥力、维持土地生产力等方面发挥着重要作用。有机碳是影响团聚体稳定性的重要因素之一,在团聚体的形成过程中,发挥着“胶结剂”的作用^[1]。一方面有机碳含量的增加可促进团聚体自身的形成,提高团聚体的稳定性;另一方面土壤团聚体能包裹土壤有机碳,从而对土壤有机碳起到物理保护,两者相互依存,最终形成良好的团聚体结构^[2]。Karami 等^[3]研究发现农田表土中 90% 的土壤有机碳位于土壤团聚体内,当团聚体的稳定性降低时,会损害团聚体对有机碳的物理性保护,使原本包含在大团聚体中的有机碳更容易被分解矿化,导致土壤中有有机碳的流量增加^[4];因此,证明了土壤团聚体稳定性和土壤有机碳息息相关。

近年发现添加生物炭和土壤耕作是影响土壤有机碳固定、驱动团聚体更新周转的主要外部因素^[5-6]。生物炭具有生物化学稳定性,富含碳元素,施入土壤可促进富里酸和腐殖酸等土壤腐殖质以及土壤碳水化合物和芳烃等有机大分子的形成,可以提高土壤有机碳含量,促进 >0.25 mm 大中团聚体的形成,减小 <0.25 mm 微团聚体含量,显著提高 MWD, GMD 和团聚体稳定性^[7]。耕作在团聚体形成中,既能分散大团聚体或促进小团聚体凝聚形成大团聚体,还能改善土壤宏观结构,影响土壤水热传输及分布,进而造成有机碳分解或固定^[8]。深松作为保护性耕作的核心技术之一,在不翻转土壤耕层的前提下有效地疏松犁底层土壤从而使耕层加深,显著提高了 1~2, 0.25~1 mm 的团聚体含量,降低了 <0.25 mm 团聚体含量,有利于促进大团聚体的形成,同时降低了有机碳的分解速率^[9]。免耕、少耕等保护性耕作方式能够减少对土壤团聚体的干扰和破坏,防止微生物对有

机碳的分解,延长有机碳在团聚体中的储存周期^[10-11]。但长期实施单一耕作措施,仍会导致农田土壤耕层变浅、容重增加、结构性变差,从而不利于植物生长^[12]。而免耕、深松和旋耕等耕作方式结合的轮作模式有助于解决长期采取单一耕作方式所带来的各种弊端,同时深松耕作能够调节土壤物理结构,影响土壤水热传输及分布^[9]。田慎重等^[13]研究表明,旋耕—深松结合模式有助于增加 0—20 cm 土层土壤团聚体稳定性并提升固碳能力,有利于发挥土壤有机胶结剂的作用,从而形成良好的团粒结构,进而促进团聚体的形成,提高团聚体的稳定性。因此,改变耕作方式配合添加生物炭对促进土壤团聚体形成与稳定性具有重要意义。

华北平原是中国典型的小麦—玉米两熟区,长期不合理的土壤管理造成土壤团聚体破坏与稳定性下降,土壤有机碳含量降低,进而影响着粮田土壤肥力提升与粮食的可持续发展。因此改变传统冬小麦旋耕—夏玉米免耕的耕作方式,采用冬小麦播种前添加生物炭、旋耕配合夏玉米深松播种的耕作方式,探索短期转变(两个轮作季)对土壤团聚体分布特征、稳定性与有机碳含量的影响,为构建麦玉轮作体系的土壤有机培肥及其相匹配的耕作制度提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在河北省邢台市宁晋县凤凰镇孟村村南原种场(114°59′N, 37°36′E),属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.8℃,无霜期为 198 d,年均日照时间 2 538.1 h,年均降雨量 449.1 mm,试验期间的气温和降水动态变化见图 1。试验期间全年降水量

和气温与常年变化基本一致。该区地处太行山东麓冲积平原扇缘, 洹河、北沙河沿东侧向东南纵流, 土壤上部具褐土特征, 但底部可以见到由氧化还原交替作

用所形成的锈斑, 土壤类型为潮褐土。试验地按照耕作土壤发生层划分, 耕作层厚度为 20.0 cm, 基本理化性质见表 1。

表 1 研究区试验地耕层土壤基本理化性质

pH 值 (2.5 : 1)	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒含量/%			有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
		黏粒	粉粒	沙粒					
8.09	1.58	4.36	61.07	34.57	9.53	0.97	5.83	10.23	188.50

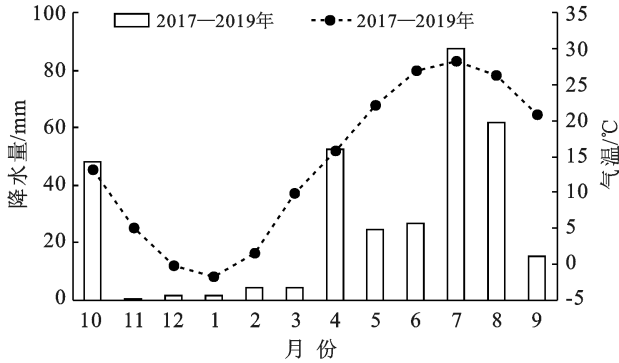


图 1 研究区小麦—玉米生长期月平均气温和降水量动态

1.2 供试材料

(1) 作物。冬小麦为“河农 6 049”, 夏玉米为“郑单 958”。

(2) 肥料。缓释尿素(N 含量 44%), 磷酸一铵(N 11%, P_2O_5 44%), 氯化钾(K_2O 60%); 追肥采用尿素(N 含量 46%)。

(3) 生物炭。果木枝条炭化, 厌氧条件下 600 °C 高温热解形成生物炭, 全碳含量为 60.2%, 全氮含量 6.8 g/kg, 全磷含量 0.93 g/kg, 全钾含量 10.40 g/kg, pH 值 9.63。

1.3 试验设计

试验于 2017 年 10 月至 2019 年 10 月进行, 经过冬小麦—夏玉米两个轮作。采用随机区组的裂区试验设计, 小麦季设 3 个不同生物炭用量处理, 生物炭用量分别为 0, 3 000, 6 000 kg/hm^2 , 简称 B_0 , B_1 和 B_2 , 每个处理重复 3 次, 共 9 个小区; 玉米季设 2 个耕作处理, 分别为传统耕作(简称 P, 小麦收获后不整地, 直接播种玉米)和深松耕作(简称 S, 采用深松机进行间隔 60 cm、耕深 30~35 cm, 宽 5 cm 的深松作业, 在深松带内进行播种), 即在冬小麦 9 个小区的基础上, 分为传统免耕和深松 2 个耕作方式, 最终玉米季形成 B_0S , B_0P , B_1S , B_1P , B_2S , B_2P 共 6 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 18 个小区, 每个小区面积 72 m^2 (10 m × 7.2 m)。

生物炭分别于 2017 年 10 月, 2018 年 10 月与小麦基肥混匀后施在地表, 然后旋耕整地播种, 播种量为

225 kg/hm^2 ; 夏玉米种植密度为 60 000 株/ hm^2 。各处理施肥量一致, 小麦基肥的养分投入量为 96 kg/hm^2 (以 N 计), 135 kg/hm^2 (以 P_2O_5 计), 105 kg/hm^2 (以 K_2O 计), 拔节期追施尿素($\geq 46\%$), 养分投入量为 144 kg/hm^2 (以 N 计); 玉米季基肥的养分投入量为 234 kg/hm^2 (以 N 计), 90 kg/hm^2 (以 P_2O_5 计), 108 kg/hm^2 (以 K_2O 计), 不进行追肥。冬小麦季灌水 3 次, 分别为冬前灌冻水 900 m^3/hm^2 , 拔节期灌水 600 m^3/hm^2 , 灌浆期灌水 600 m^3/hm^2 ; 玉米季灌水 2 次, 分别在拔节期和灌浆期, 每次灌水量为 600 m^3/hm^2 。冬小麦和夏玉米均在出苗后喷洒除草剂, 其他管理方式同当地日常管理。

1.4 样品采集

在 2018 年 10 月与 2019 年 10 月的玉米成熟期, 采用土钻在每个小区以 S 形采集 5 个耕层土样, 混合土样放置封口袋带回实验室风干, 过 0.15 mm 尼龙筛, 用于测定土壤有机碳。在每个小区用环刀采集 3 个 0—10 cm 土壤样品, 用于测定土壤容重。使用一次性饭盒采集耕层的原状土样, 在采集和运输过程中尽量减少扰动, 以免破坏土壤团聚体; 风干后沿自然裂隙掰成约 1 cm 的小土块, 剔除根系及杂质, 用于土壤团聚体分级测定。

1.5 指标测定

土壤容重: 用环刀采回的土称量后置于烘箱中, 于 105 °C 下烘干至恒量, 单位容积环刀内的烘干土质量即为土壤容重^[14]。

(1) 土壤有机碳。采用 0.8 mol/L $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法^[14]。

(2) 土壤团聚体测定与相关计算。

采用干筛法和湿筛法测定土壤机械性团聚体和水稳性团聚体粒级^[15], 筛子孔径为 5, 2, 1, 0.50, 0.25 mm。相关计算公式如下:

$$\text{DR}_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

$$\text{WR}_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (3)$$

$$\text{PAD} = \left[(\text{DR}_{0.25} - \text{WR}_{0.25}) / \text{DR}_{0.25} \right] \times 100\% \quad (4)$$

$$ELT = [(W_T - WR_{0.25}) / W_T] \times 100\% \quad (5)$$

式中:DR_{0.25}为>0.25 mm的机械稳定性团聚体比例(%);WR_{0.25}为>0.25 mm的水稳定性团聚体比例(%);MWD为平均质量直径(mm);PAD团聚体破坏率(%);ELT为土壤不稳定团粒指数(%);w_i为第*i*粒级团聚体质量所占的百分含量(%);W_T为供试土样的总质量(g);x_i为某级团聚体的平均直径(mm)。

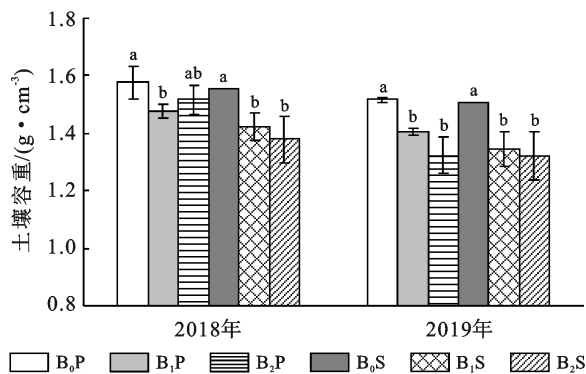
1.6 数据处理

本试验数据处理采用SPSS软件(IBM 20.0)进行方差分析,Excel 2010和sigmaplot 12.5绘制图表。

2 结果与分析

2.1 生物炭配合深松对耕层土壤容重的影响

不同处理土壤容重见图2。在2018年试验中发现,同一耕作方式下,由于添加生物炭土壤容重呈降低趋势。在传统耕作下,处理B₁P比B₀P显著下降6.80%,在深松耕作下,处理B₁S、B₂S分别比B₀S显著降低9.17%和12.54%,深松处理的平均容重比传统处理的容重低4.95%,其中B₂S处理的容重最低,值为1.38 g/cm³。2019年的土壤容重与2018年相比整体呈下降趋势,其中在相同耕作水平下,表现为:B₂S < B₁S < B₀S与B₂P < B₁P < B₀P,且B₂P、B₁P比B₀P分别显著下降14.73%,8.09%,B₂S、B₁S比分别B₀S显著降低13.59%,11.81%,在相同施炭水平下,深松处理下的土壤容重均低于传统处理,且于2019年B₂S处理下取得最小值为1.32 g/cm³。由于年份对其产生显著影响,由此得知两个轮作后,施加6 000 kg/hm²生物炭配合深松耕作对土壤容重改良效果更优。



注:①处理中B为生物炭用量(0,1,2分别为0,3 000,6 000 kg/hm²);P为传统耕作(小麦收获后不整地,直接播种玉米);S为深松耕作。②不同小写字母表示同一年份处理间差异显著($p < 0.05$),ns为无差异。③*为 $0.01 < p \leq 0.05$,**为 $p \leq 0.01$ 。下同。

图2 2018年和2019年不同处理的土壤容重

2.2 生物炭配合深松对土壤有机碳的影响

土壤有机碳(SOC)含量变化见图3。2018年的结果表明,同一生物炭用量下,各处理土壤有机碳含

量均表现为深松耕作高于传统耕作,即:B₂S > B₂P, B₁S > B₁P, B₀S > B₀P,差异均达到显著水平,其中B₂S处理较B₂P显著增加31.82%。两种耕作方式下,随生物炭用量的增加有机碳含量有所提高,但并未出现显著差异。2019年结果表明连续两年添加生物炭,同一处理下有机碳含量均表现出第二个轮作高于第一个轮作的结果,且深松处理有机碳含量均高于传统处理,在相同施炭水平下,表现出深松高于传统,6 000 kg/hm²生物炭用量高于其他两个生物炭用量处理,即:B₂S > B₂P > B₁S > B₁P > B₀S > B₀P的趋势,其中B₁S处理的有机碳含量比B₁P显著增加21.40%,B₂S处理的有机碳含量为最大值11.77 g/kg,比B₂P提高1.00%。因此,表明连年施用生物炭配合深松耕作加剧了生物炭的有效利用。

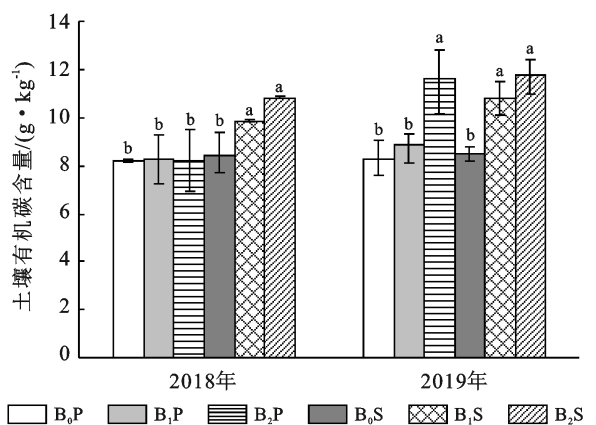


图3 2018年和2019年不同处理的土壤有机碳含量

2.3 生物炭配合深松对土壤团聚体的影响

2.3.1 对耕层土壤团聚体分级的影响

(1)机械性团聚体的粒径分级。由表2可知,2018年各处理均表现为>5 mm团聚体的分布比例最高,占总量的54.31%~63.50%。2~1 mm,5~2 mm及>5 mm粒级中的含量走势基本一致,传统耕作和深松耕作的粒级团聚体含量均表现为随着生物炭用量的增加而增加,即:B₂S > B₁S > B₀S和B₂P > B₁P > B₀P,<0.25 mm团聚体则呈现出相反的趋势。在同一施炭水平下,B₂S处理的2~1 mm团聚体含量比B₂P处理高1.31%,且差异显著。5~2 mm和>5 mm两个粒级团聚体百分含量则表现为B₂S处理的占比最多,但与其他处理未表现出显著差异。2019年试验结果中也表现为>5 mm团聚体的分布比例最高,占总量的47.56%~54.79%。在施炭水平相同的情况下,B₂S处理在2~1 mm粒级百分含量较B₂P处理显著增加1.41%,且B₂S处理效果均优于其他处理。在相同的耕作方式下,5~2 mm及>5 mm粒级百分含量均表现为施加生物炭处理高于未施加生物炭处理。

表 2 2018 年和 2019 年不同处理土壤机械稳性团聚体粒径分布

项目	处理	不同粒径土壤团聚体百分含量/%					
		<0.25 mm	0.5~0.25 mm	1~0.5 mm	2~1 mm	5~2 mm	>5 mm
2018 年	B ₀ P	16.93±3.76 ^a	9.54±4.60 ^{ab}	6.92±0.17 ^a	5.79±0.18 ^c	4.68±0.88 ^b	56.14±1.87 ^c
	B ₁ P	10.51±0.21 ^b	9.13±0.65 ^{ab}	7.09±0.69 ^a	6.29±0.16 ^b	6.49±1.19 ^a	60.49±1.43 ^b
	B ₂ P	7.15±1.54 ^b	8.05±0.92 ^b	8.65±0.23 ^a	6.12±0.25 ^{bc}	7.64±0.45 ^a	62.38±0.90 ^{ab}
	B ₀ S	15.01±1.33 ^a	12.83±0.41 ^a	7.04±1.97 ^a	6.05±0.21 ^{bc}	4.76±0.60 ^b	54.31±2.11 ^c
	B ₁ S	9.81±1.05 ^b	9.41±2.14 ^{ab}	6.90±0.66 ^a	7.33±0.44 ^a	6.33±0.77 ^a	60.22±1.52 ^b
	B ₂ S	7.36±1.55 ^b	7.83±2.25 ^b	7.47±0.16 ^a	7.43±0.21 ^a	6.42±0.44 ^a	63.50±1.57 ^a
2019 年	B ₀ P	15.98±3.78 ^a	6.19±1.05 ^a	6.52±0.79 ^{ab}	7.50±1.02 ^d	11.93±2.60 ^c	51.87±2.66 ^{bc}
	B ₁ P	7.87±2.63 ^b	7.65±2.34 ^a	7.82±3.29 ^a	8.90±2.41 ^c	13.86±1.49 ^{bc}	53.90±0.53 ^{ab}
	B ₂ P	7.63±2.30 ^b	6.34±2.01 ^a	7.46±1.63 ^{ab}	9.87±2.13 ^b	14.99±2.38 ^b	53.70±1.96 ^{ab}
	B ₀ S	15.25±0.91 ^a	4.63±2.19 ^a	5.46±0.76 ^b	11.14±2.01 ^a	15.96±0.75 ^{ab}	47.56±1.68 ^c
	B ₁ S	8.14±1.85 ^b	6.06±1.21 ^a	5.09±0.95 ^b	10.84±3.02 ^a	16.53±3.01 ^{ab}	53.34±1.03 ^{ab}
	B ₂ S	4.11±0.26 ^b	4.76±0.57 ^a	6.57±2.42 ^{ab}	11.28±0.53 ^a	18.48±1.47 ^a	54.79±1.57 ^a
F 检验	耕作	ns	ns	ns	**	ns	ns
	生物炭	**	ns	ns	**	**	**
	耕作×生物炭	ns	ns	ns	*	ns	ns
	年份	ns	**	*	**	**	**
	耕作×年份	ns	*	ns	**	ns	ns
	生物炭×年份	ns	*	ns	ns	**	ns
	耕作×生物炭×年份	ns	ns	ns	**	ns	ns

注:①表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示同一年份处理间差异显著($p < 0.05$),ns 为无差异;② * 为 $0.01 < p \leq 0.05$, ** 为 $p \leq 0.01$ 。下同。

(2) 水稳性团聚体的粒径分级。由表 3 可以看出,2018 年和 2019 年各粒径水稳性团聚体 <0.25 mm 粒级的团聚体比例最高。除 <0.25 mm 团聚体粒级外,其余各粒径百分含量均表现为添加生物炭的处理高于未添加生物炭的处理。2018 年在同等施炭量水平下,各处理 <0.25 mm 团聚体百分含量均为深松耕作低于传统耕作,但差异不显著;1~0.5,5~2 mm 团聚体百分含量呈现出 $B_0P < B_0S, B_1P < B_1S$ 和 $B_2P < B_2S$ 的规律,且均在 B_2S 处理达到最大含量,其中 B_2S 处理的 1~0.5 mm 团聚体百分含量比 B_2P 处理显著增加 1.64%。2019 年结果显示,<0.25,1~0.5, >5 mm 团聚体百分含量与 2018 年趋势一致,同一耕作方式的各粒径百分含量均为施炭处理显著高于不施炭处理。在相同施炭水平下,1~0.5 mm 团聚体百分含量的 B_1S 与 B_1P 处理无显著差异,但 B_2S 处理比 B_2P 显著增加 0.93%,其他两个粒级均未受到生物炭与耕作方式的影响。

2.3.2 对 >0.25 mm 团聚体含量的影响 >0.25 mm 团聚体为大团聚体,含量越高说明团聚体的机械稳定性以及水稳性、通气透水性越好,进一步说明土壤团聚体的结构越好^[16]。DR_{0.25} 和 WR_{0.25} 的质量分数可以用来说明团聚体在土壤中的数量和分布情况。

从图 4 看出,DR_{0.25} (>0.25 mm 机械性团聚体)含量在两年的趋势一致,但 2019 年各处理下 DR_{0.25} 普遍高于 2018 年各处理;在相同施炭处理下,各处理 >0.25 mm 机械性团聚体含量均为深松耕作大于传统耕作,但差异不显著。同一耕作方式下添加生物炭处理显著高于未添加生物炭的各处理。2018 年结果显示,DR_{0.25} 在两种耕作下均表现出随着生物炭用量的增加而增加的趋势,即: $B_2S > B_1S > B_0S, B_2P > B_1P > B_0P$,其中 B_2S 与 B_1S 较 B_0S 分别显著增加 7.66% 和 5.20%, B_2P 和 B_1P 比 B_0P 多 9.77%,6.42%,差异也达到显著水平;深松处理 DR_{0.25} 平均比传统处理高 2.40%。另外,2019 年生物炭配合耕作的 B_2S 处理 DR_{0.25} 值最大,由此说明添加生物炭配合深松耕作能促进土壤结构的改良。由图 5 可知,WR_{0.25} (>0.25 mm 水稳性团聚体)与 DR_{0.25} 含量的趋势基本一致,2018 年传统耕作下的 B_2P 和 B_1P 比 B_0P 显著增加 9.38% 和 6.74%,深松耕作下的 B_2S 和 B_1S 处理比 B_0S 分别显著增加 10.35% 和 7.62%。2019 年 B_2S 处理的 WR_{0.25} 含量最高,为 36.75%。综合分析两个轮作的 DR_{0.25} 与 WR_{0.25},均表现为同一生物炭施用量下深松处理高于传统处理,表明深松耕作对土壤大团聚体的形成具有明显效果。

表 3 2018 年和 2019 年不同处理水稳性团聚体粒级分布

项目	处理	不同粒径土壤团聚体百分含量/%					
		<0.25 mm	0.5~0.25 mm	1~0.5 mm	2~1 mm	5~2 mm	>5 mm
2018 年	B ₀ P	78.62±1.00 ^a	7.68±2.29 ^a	5.12±0.29 ^c	3.59±1.27 ^a	2.81±0.93 ^b	2.17±0.24 ^b
	B ₁ P	71.89±2.39 ^b	9.16±2.99 ^a	6.29±1.06 ^b	5.76±2.27 ^a	4.33±0.15 ^{ab}	2.57±0.44 ^b
	B ₂ P	69.25±3.01 ^b	9.64±3.89 ^a	6.12±0.34 ^b	5.32±2.33 ^a	4.39±1.44 ^{ab}	5.29±1.53 ^a
	B ₀ S	77.84±1.74 ^a	6.81±0.06 ^a	5.20±0.28 ^c	4.37±1.18 ^a	3.36±1.53 ^b	2.41±0.33 ^b
	B ₁ S	70.22±4.47 ^b	8.17±3.79 ^a	6.66±0.28 ^b	5.36±1.61 ^a	6.61±1.76 ^a	2.97±0.91 ^b
	B ₂ S	67.50±1.73 ^b	8.64±1.85 ^a	7.76±0.02 ^a	5.47±1.87 ^a	6.03±1.44 ^a	4.61±0.69 ^a
2019 年	B ₀ P	76.33±0.44 ^a	6.13±0.92 ^a	6.19±0.35 ^c	2.03±0.52 ^b	5.65±1.59 ^a	3.65±0.42 ^b
	B ₁ P	66.39±7.20 ^b	6.25±1.79 ^a	6.82±0.27 ^{bc}	7.50±5.79 ^{ab}	6.32±0.51 ^a	6.18±2.65 ^{ab}
	B ₂ P	64.13±2.90 ^b	6.98±0.90 ^a	7.12±0.89 ^b	10.12±2.09 ^a	6.20±0.96 ^a	6.11±3.18 ^{ab}
	B ₀ S	76.17±4.24 ^a	6.40±2.11 ^a	5.07±0.11 ^d	3.87±1.96 ^{ab}	4.02±2.02 ^a	4.46±1.16 ^{ab}
	B ₁ S	64.33±7.54 ^b	8.39±2.11 ^a	6.92±0.31 ^{bc}	6.31±2.19 ^{ab}	6.41±2.14 ^a	7.64±2.82 ^{ab}
	B ₂ S	61.92±1.67 ^b	7.34±0.33 ^a	8.05±0.21 ^a	8.16±5.90 ^{ab}	5.27±3.45 ^a	8.72±2.76 ^a
F 检验	耕作	ns	ns	**	ns	ns	ns
	生物炭	**	ns	**	*	**	**
	耕作×生物炭	ns	ns	**	ns	ns	ns
	年份	*	ns	*	ns	ns	**
	耕作×年份	ns	ns	*	ns	ns	ns
	生物炭×年份	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	耕作×生物炭×年份	ns	ns	ns	ns	ns	ns

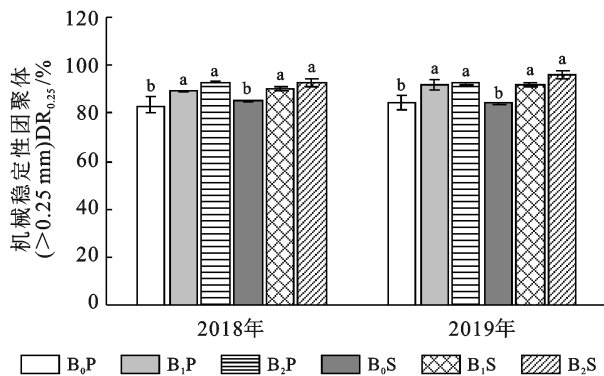


图 4 2018 年和 2019 年不同处理团聚体 (DR_{0.25}) 含量

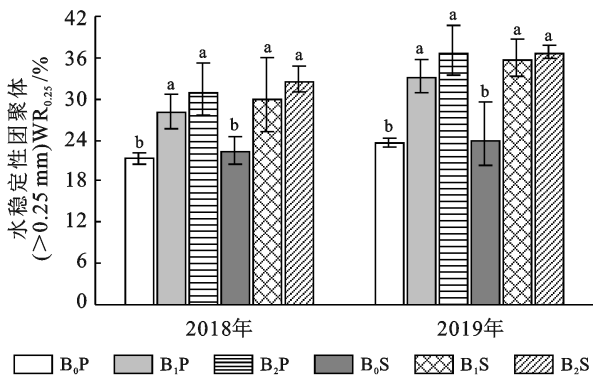


图 5 2018 年和 2019 年不同处理团聚体 (WR_{0.25}) 含量

稳定性的常用指标, MWD 值越大, 团聚体的稳定性越高^[16]。

由表 4 试验结果分析可知, 施加生物炭不同程度提高了土壤机械团聚体及土壤水稳团聚体的 MWD。在相同耕作方式下, 两年的趋势均表现出随生物炭用量的增加 MWD 增加的趋势, 即: B₂S>B₁S>B₀S, B₂P>B₁P>B₀P。干筛下, 2018 年的 B₂P 处理的 MWD 比 B₀P 处理显著增加 12.65%, B₂S 处理较 B₀S 显著增加 16.16%; 2019 年试验结果显示同一生物炭施用量下, B₁S 比 B₁P 增加 2.02%, B₂S 比 B₂P 增加 5.10%, 表明深松耕作方式下随生物炭用量的增加 MWD 增加效果更明显。湿筛下, 在相同耕作方式下两年数据均显示土壤团聚体的 MWD 随着生物炭用量的增加而升高, 与干筛呈现一样的趋势。2018 年相同施炭量水平下的 B₁S 比 B₁P 增多 14.14%, B₂S 比 B₂P 增加 3.97%, 未达显著水平。F 检验得出年份对 MWD 产生了极显著的影响, 说明 2019 年各处理 MWD 整体比 2018 年有显著增加的趋势。同时可以看出各处理干筛法 MWD 远大于湿筛法, 这可能是大量水稳性团聚体在水分作用下分解的结果。

2.3.4 对团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (ELT) 的影响 土壤团聚体破坏率 (PAD) 和土壤不稳定团粒指数 (ELT) 均为土壤团聚体稳定性指标, 其数值越小说明土壤团聚体破坏率越小, 土壤结构越稳定^[17]。

2.3.3 对 > 0.25 mm 团聚体 MWD 的影响 土壤团聚体的平均重量直径 (MWD) 是反映出土壤团聚体

表 4 2018 年和 2019 不同处理的平均质量直径 (MWD)

处 理	干筛法 MWD/mm		湿筛法 MWD/mm	
	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年
B ₀ P	3.19±0.06 ^c	3.24±0.14 ^c	0.52±0.04 ^d	0.67±0.04 ^b
B ₁ P	3.46±0.03 ^b	3.42±0.16 ^b	0.63±0.02 ^{bc}	0.88±0.15 ^{ab}
B ₂ P	3.59±0.04 ^a	3.46±0.07 ^b	0.75±0.05 ^a	0.91±0.14 ^{ab}
B ₀ S	3.11±0.08 ^c	3.20±0.08 ^c	0.56±0.06 ^{cd}	0.67±0.08 ^b
B ₁ S	3.45±0.06 ^b	3.49±0.07 ^b	0.72±0.07 ^{ab}	0.95±0.22 ^{ab}
B ₂ S	3.62±0.08 ^a	3.63±0.10 ^a	0.78±0.05 ^a	0.98±0.16 ^a
耕作	ns		ns	
生物炭	**		**	
F 耕作×生物炭	ns		ns	
检 年份	ns		**	
验 耕作×年份	ns		ns	
生物炭×年份	ns		ns	
耕作×生物炭×年份	ns		ns	

由表 5 可以看出,在 2018 年试验中,深松耕作的 PAD 和 ELT 较传统耕作有下降趋势,但差异不显著;同一耕作下各处理的 PAD 随着生物炭用量的增加呈现出下降趋势,B₂P 处理的 PAD 值比 B₀P 显著下降 7.43%,B₂S 较 B₀S 显著下降 8.77%,由于生物炭的吸附能力较强,添加生物炭能显著降低团聚体的破坏率;在施用等量生物炭水平下,ELT 呈现出 B₀P < B₀S, B₁P < B₁S, B₂P < B₂S 的趋势, B₂S 比 B₂P 下降 3.51%,由此进一步说明生物炭配合深松能显著降

低团聚体的不稳定性。2019 年的试验结果显示, PAD 与 ELT 下降趋势和 2018 年的基本一致,但添加等量生物炭时,不同耕作方式下的各处理并未达到显著水平。

由 F 检验得出,生物炭对 PAD 与 ELT 分别产生了极显著影响,同时年份对 PAD 与 ELT 也分别产生了显著影响,且两个轮作后各处理下的 PAD 与 ELT 均低于第一个轮作各处理的结果,同时于第 2 个轮作后 B₂S 处理取得最小值。

表 5 2018 年和 2019 不同处理的土壤团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (ELT)

处 理	土壤 PAD/%		土壤 ELT/%	
	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年
B ₀ P	74.27±0.77 ^a	71.78±1.77 ^a	57.25±1.99 ^a	52.67±0.87 ^a
B ₁ P	68.57±2.86 ^{ab}	63.94±1.95 ^b	43.77±1.34 ^{ab}	33.87±4.41 ^b
B ₂ P	66.84±5.16 ^b	60.40±1.98 ^b	38.50±1.02 ^b	26.93±2.08 ^b
B ₀ S	73.65±2.46 ^a	71.92±1.70 ^a	55.69±3.48 ^a	52.35±1.48 ^a
B ₁ S	66.97±5.09 ^b	61.18±1.11 ^b	40.45±1.93 ^{ab}	28.65±2.08 ^b
B ₂ S	64.88±2.59 ^b	60.29±1.67 ^b	34.99±1.42 ^b	23.84±2.33 ^b
耕作	ns		ns	
生物炭	**		**	
F 耕作×生物炭	ns		ns	
检 年份	*		*	
验 耕作×年份	ns		ns	
生物炭×年份	ns		ns	
耕作×生物炭×年份	ns		ns	

3 讨论

研究表明添加生物炭可以显著增加土壤中的有机碳含量^[5,7],而耕作对土壤有机碳的影响并不统一。有研究认为免耕能最低限度的扰动土壤,比深松耕作下的有机碳含量高^[18];也有学者认为深松耕作使下

层土壤的腐殖质翻到上层,更利于表层土壤有机碳的积累^[19]。在本研究中,冬小麦季添加生物炭 6 000 kg/hm² 配合夏玉米季深松播种,土壤有机碳含量比冬小麦未施生物炭配合夏玉米季免耕的处理显著提高了 42.15%,比施用等量生物炭与免耕的处理提高 1.03%。由此说明生物炭配合深松耕作对有机碳的

提高具有协调作用。是因为生物炭本身较高的碳含量和较强的吸附保护作用,能够固持有机碳,抑制土壤有机碳的分解,从而增加了土壤有机碳含量^[7];深松耕作在一定程度上将生物炭翻转到下部土壤,有利于年轻腐殖质的形成和累积,同时也能够将下层较稳定腐殖质以及富里酸翻耕到上部土壤,从而可以不断提升表层土壤有机碳含量^[19]。而且长期免耕会造成土壤紧实,不利于根系深扎,使土壤中有有机碳补充速率变慢^[12],因此证明免耕持续一段时间后,需进行一次深松作业。

团聚体对保持土壤结构稳定性具有重要作用,可准确反映不同农业生产措施对土壤结构的影响^[20]。本试验中, $R_{0.25}$,MWD等表征土壤团聚体稳定性的参数均随生物炭用量的增加而增加,表征团聚体不稳定性的PAD和ELT显著降低。这与Du等^[21]的研究结果一致,主要是由于生物炭作为一种能改善土壤物理结构的新型调理剂,富含丰富的碳元素,一方面能提高土壤的有机质含量及土壤微生物数量^[22],刺激土壤生物活性增强,从而产生更多的分泌物对土壤起团聚作用;另一方面,生物炭多孔、表面积大,吸附了大量土壤黏粒,形成土壤团聚体^[23]。本试验中的生物炭配合深松耕作处理,能显著提高大团聚体含量和稳定性,这主要是生物炭还可以抵消耕作因素对土壤过度干扰的阻力,增强了有机碳固定,提高了大团聚体含量。

土壤团聚体是有机碳存在的场所,有机碳是团聚体形成的重要胶结物质,二者相互促进,密不可分,综合分析可知,土壤中添加生物炭,可以增加有机质含量,促进土壤大团聚体的形成,提高土壤团聚体稳定性,因此生物炭可以作为农业生产中重要的肥料资源。深松是保护性耕作的的一个关键组成部分,可以减少土壤压实,降低土壤容重,改善土壤结构,并促进秸秆、残茬和根向土壤有机碳转化,进而促进团聚体形成^[24]。长期进行小麦旋耕—玉米免耕的耕作模式增大了土壤紧实度,导致施用肥料不能高效利用,从而造成耕层浅薄,直接导致耕层土壤大团聚体(>0.25 mm)含量下降,土壤结构稳定性降低。Tian等^[25]研究发现,长期免耕转换成深松有利于改善华北地区的土壤固碳。本试验的研究结果表明,冬小麦季添加生物炭+夏玉米季深松播种能有效提高有机碳含量,促进土壤大团聚体形成及其稳定性。因此,探究耕作方式转变配合添加生物炭对于改良土壤结构具有重要意义。

4 结论

施用生物炭配合深松能显著提高土壤有机碳含

量、降低土壤容重,促进土壤大团聚体形成,增强土壤团聚体稳定性。在华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系中,冬小麦季添加 $6\ 000\text{ kg/hm}^2$ 生物炭+夏玉米季深松耕作能有效改善土壤团聚体数量及稳定性。

[参考文献]

- [1] 史振鑫,吴景贵.不同处理牛粪对黑土团聚体组成与稳定性的影响[J].中国土壤与肥料,2013(4):10-15.
- [2] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [3] Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012,148:22-28.
- [4] 王峻,薛永,潘剑君,等.耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):121-127.
- [5] 王丽,李军,李娟,等.轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2014,25(3):759-768.
- [6] Besnard E,Chenu C,Balesdent J,et al.Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation [J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(4):495-503.
- [7] Liu Shuhong, Kong Fanlong, Li Yue, et al. Mineralions modified biochars enhance the stability of soil aggregate and soil carbon sequestration in a coastal wetland soil [J]. Catena, 2020,193:104618.
- [8] Zotarelli L, Alves B J R, Urquiaga S, et al. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols [J]. Soil and Tillage Research, 2007,95(1/2):196-206.
- [9] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J].中国农业科学,2021,54(2):334-344.
- [10] Barto E K, Alt F, Oelmann Y, et al. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(12):2316-2324.
- [11] 余海英,彭文英,马秀,等.免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):99-104.
- [12] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):378-386.
- [13] 田慎重,王瑜,张玉凤,等.旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J].农业工程学报,2017,33(24):133-140.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:30-49.

(下转第385页)

- 2016,29(6):262-270.
- [20] 魏燕茹,陈松林.福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J].生态学报,2021,41(14):5814-5824.
- [21] 袁壮壮,叶长盛,李辉丹.基于土地利用变化的南昌市碳排放效应分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(5):30-39.
- [22] Fang Jingyun, Yu Guirui, Liu Lingli, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4015-4020.
- [23] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018,115(16):4021-4026.
- [24] Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005,19(2).
- [25] 孔东升,张灏.张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J].生态学报,2015,35(4):972-983.
- [26] 赖力,黄贤金,刘伟良,等.基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析:以2002年江苏省经济为例[J].生态学报,2006,26(4):1285-1292.
- [27] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [28] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
- [29] 靳诚,陆玉麒.基于县域单元的江苏省经济空间格局演化[J].地理学报,2009,64(6):713-724.
- [30] Stewart Fotheringham A, Charlton M, Brunsdon C. The geography of parameter space: An investigation of spatial non-stationarity [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1996,10(5):605-627.
- [31] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 2010,28(4):281-298.
- [32] 王雅楠,赵涛.基于GWR模型中国碳排放空间差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):27-34.
- [33] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships [M]. Chichester: Wiley, 2002.
- [34] 赵雲泰,黄贤金,钟太洋,等.1999—2007年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J].环境科学,2011,32(11):3145-3152.
- [35] 何文举,张华峰,陈雄超,等.中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究:基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J].南开经济研究,2019(2):207-225.
- [36] Yuan Baolong, Ren Shenggang, Chen Xiaohong. The effects of urbanization, consumption ratio and consumption structure on residential indirect CO₂ emissions in China: A regional comparative analysis [J]. Applied Energy, 2015,140:94-106.

(上接第375页)

- [15] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):274-281.
- [16] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [17] 王润泽,湛芸,李铁,等.紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [18] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2013,126:151-158.
- [19] Paciolla M D, Kolla S, Sein L T, et al. Generation of Free Radicals by Humic Acid: Implications for Biological Activity-Humic Substances: Structures, Properties and Uses [M]// Humic Substances, 1998:203-214.
- [20] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [21] Du Zhangliu, Zhao Jiankun, Wang Yiding, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017,17(3):581-589.
- [22] 梁利宝,冯鹏艳.生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):305-308.
- [23] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对塿土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- [24] 王玉玲,李军.利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1139-1150.
- [25] Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Wang Yu, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China [J]. Soil and Tillage Research, 2016,163:207-213.