

生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征

杨卫君, 惠超, 陈雨欣, 宋世龙, 杨梅, 郭颂

(新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 试验研究了不同筛分方法下生物质炭施用对土壤团聚体的影响, 为生物质炭农业利用提供理论依据。设置生物质炭用量 4 个水平(0, 10, 20, 30 t/hm²), 氮肥用量 2 个水平(0, 150 kg/hm²), 通过 2 年田间定位试验, 测定分析干筛法和湿筛法 0—30 cm 土层土壤团聚体分布及稳定性。结果表明: 2 种筛分方式下, 不同处理各粒级土壤团聚体分布趋势基本一致, 干筛法所得机械土壤团聚体主要以 >5, 2~5 0.5~1 mm 粒级为主, 而湿筛法水稳性团聚体均以 0.25~0.5 mm 及 <0.25 mm 为主; 不同处理干筛法土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均高于湿筛法。湿筛法下各处理, 无论施氮与否, MWD、GMD 均随生物质炭量增加而增大。其中, B0N0 处理 MWD、GMD 最小, 单施生物质炭 B3N0 处理土壤团聚体直径最大, 分别较 B0N0 显著提高 60%(MWD)和 52%(GMD); 各处理土壤团聚体破坏率(PAD)随生物质炭量增加而减小, 土壤团聚体稳定率(WASR)则随生物质炭量增加呈上升趋势; 干筛法各处理分形维数(D)均低于湿筛法, 随生物质炭量增加 D 值不断降低, B3 生物质炭量下分形维数最低, 分别为 2.63(B3N0)和 2.64(B3N1), 分别较对照降低 3.3%和 2.9%; 分形维数(D)与 >0.25 mm 土壤团聚体含量(R_{>0.25})呈显著负相关关系。试验条件下, 生物质炭添加量为 30 t/hm²时土壤团聚体稳定性最佳。同时, 湿筛法较干筛法能更好地模拟大田环境, 真实反映土壤团聚体分布及其稳定性。

关键词: 生物质炭; 土壤团聚体; 平均重量直径; 分形维数

中图分类号: S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)06-0323-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.039

Stability and Fractal Features of Soil Aggregate in Irrigated Farmland Under Biochar Application

YANG Weijun, HUI Chao, CHEN Yuxin, SONG Shilong, YANG Mei, GUO Song

(College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

Abstract: The effects of biochar application on soil aggregates under different sieving methods were studied experimentally to provide a theoretical basis for the agricultural utilization of biochar. Four levels of biochar dosage (0, 10, 20 and 30 t/hm²) and two levels of nitrogen fertilizer dosage (0 and 150 kg/hm²) were set up in the experiment. Through two-year field positioning test, the distribution and stability of soil aggregates in 0—30 cm soil layer were measured and analyzed by dry sieving method and wet sieving method. The results showed that under the two sieving methods, the distribution trends of soil aggregates of each particle size in different treatments were basically the same. The mechanical soil aggregates obtained by the dry sieving method were mainly of >5 mm, 2~5 mm and 0.5~1 mm, while the water-stable aggregates obtained by the wet sieving method were mainly of 0.25~0.5 mm and <0.25 mm. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates in the dry sieving method were higher than those in the wet sieving method. In all treatments under wet sieving method, whether nitrogen was applied or not, both MWD and GMD increased with the increasing of biochar content. Among them, the MWD and GMD of the B0N0 treatment were the smallest, and the diameter of the soil aggregates in B3N0 (single application of biochar) was the largest, which was significantly higher than that of B0N0 by 60% (MWD) and 52% (GMD), respectively. The soil aggregate destruction rate (PAD) decreased with the increasing of biochar amount, while the soil aggregate stability rate (WASR) increased with the increasing of biochar amount. The

fractal dimension (D) of each treatment in the dry sieving method was lower than that in the wet sieving method. The D value decreased continuously with the increasing of the biochar amount, and the fractal dimension of B3 biochar was the lowest, which were 2.63 (B3N0) and 2.64 (B3N1), respectively, 3.3% and 2.9% lower than that of the control. There was a significant negative correlation between the fractal dimension (D) and the content of soil aggregate larger than 0.25 mm ($R_{>0.25}$). Under the experimental conditions, the soil aggregate stability was the best when the amount of biochar was 30 t/hm². At the same time, the wet sieving method could better simulate the field environment than the dry sieving method, and truly reflect the distribution and stability of soil aggregates.

Keywords: biochar; soil aggregates; average weight diameter; fractal dimension

土壤团聚体是土壤的基本功能单位之一,是评价土壤肥力状况的重要指标^[1]。目前,评价土壤团聚体稳定性的指标主要包括>0.25 mm 土壤团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)、团聚体破坏率(PAD)和团聚体稳定率(WASR)^[2]。一般认为,>0.25 mm 土壤团聚体含量越多,MWD、GMD、WASR 越大,土壤团聚体分布状况与稳定性越好^[3],而分形维数(D)和 PAD 越小,土壤结构越稳定^[4]。研究土壤团聚体稳定性的方法主要以干筛法和湿筛法为主,分别对应团聚体机械稳定性与水稳定性^[5]。外源碳输入可改变土壤结构、有机胶结物质以及土壤微生物的活动^[6],促进土壤有机质在土壤团聚体中重新组合再分配^[7],影响土壤团聚体的稳定性。生物质炭因其富含碳,具有疏松多孔、比表面积大、官能团丰富等特性^[8],被认为是一种可兼具增产和土壤固碳的良好外源添加物^[9],因而被广泛应用在农业生产中。有研究^[10]认为,将生物质炭应用于农业生产中有利于改善土壤结构,提高土壤团聚体稳定性;但也有研究^[11]认为,生物质炭添加并不能改善土壤团聚体结构,目前尚无定论,主要是因为土壤团聚体稳定性与土壤性质、生物质炭种类及生物质炭用量均相关^[12-13]。因此,探究生物质炭对土壤团聚体稳定性影响的机理对改善土壤质量、提高农业生产力具有重要意义。

北疆灌区农田生物质炭应用范围小,目前关于生物质炭输入研究主要集中在土壤污染治理方面^[14],而关于其对土壤结构影响的研究鲜有报道。本研究主要探讨干筛法和湿筛法下生物质炭施用对土壤团聚体分布、大小及稳定性的影响,以确定土壤中施用生物质炭对土壤团聚体造成的差异,为生物质炭在北疆灌区农田中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设在新疆奇台麦类试验站(89°13′—91°22′E, 42°25′—45°29′N)。奇台属于温带大陆性气候,年平均气温 5.5 ℃,7 月平均气温 22.6 ℃,极端最高气温

39 ℃,1 月平均气温—18.9 ℃,极端最低气温—37.3 ℃,年平均相对湿度 60%,无霜期年平均 153 天(从 4 月下旬到 10 月上旬),年平均降水量 269.4 mm。试验地土壤类型为灰漠土,0—20 cm 土层有机质含量 15.15 g/kg,总氮含量 0.93 g/kg,速效磷含量 7.10 mg/kg,速效钾含量 351 mg/kg,pH 8.25。

1.2 试验材料与设计

1.2.1 供试材料 本试验所用生物质炭(棉秆)由新疆农业科学院提供,粒径为 1.5~2.0 mm,碳化温度 450 ℃,碳化时间 4 h,pH 9.37,全氮含量 21.76 g/kg,碱解氮含量 5.38 mg/kg,速效磷含量 200.94 mg/kg。供试品种为“新春 37 号”。

1.2.2 试验设计 试验于 2018 年 9 月开始,采用随机区组设计。设 4 个生物质炭水平(B0、B1、B2、B3)、氮肥用量 2 个水平(N0、N1),共计 8 个处理,每个小区面积 9 m²(3 m×3 m),每个处理 3 次重复,共计 24 个小区。于 2018 年播种前将生物质炭均匀撒于田间表土,再人工均匀翻入 30 cm 土层,此后 2 年不再施入。氮肥采用尿素(纯氮 46%)作为基肥一次性施入。播种方式为等行距条播,种植密度 450 万株/hm²,行距 20 cm,其他管理措施与当地一般高产田相同。本试验处理具体施肥用量见表 1。

表 1 田间试验各处理生物质炭和氮肥用量

处理	生物质炭/ (t·hm ⁻²)	纯氮/ (kg·hm ⁻²)
CK(B0N0)	0	0
B1N0	10	0
B2N0	20	0
B3N0	30	0
B0N1	0	150
B1N1	10	150
B2N1	20	150
B3N1	30	150

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土样采集与土壤团聚体筛分(干筛法、湿筛法) (1)2020 年春小麦收获后,在每个小区用五点取样法采集 0—30 cm 土层土壤,混合装袋带回,在室内风干

过程中沿土壤自然缝隙将土壤掰成<1 cm 的小块。

(2)干筛法:每小区称取风干土样 500 g,分多次置于孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛顶部,人工摇动套筛 2~3 min,摇筛结束后静置 1 min,收集各层筛面上的土壤团聚体分别称重,记录并装袋;湿筛法:将干筛法所得各粒级土壤团聚体按干筛比例配成土样 100 g,置于孔径依次为 5,2,1,0.5 mm 套筛顶部,将套筛浸没在高于套筛顶部 2~3 cm 的水桶中静置 10 min,手工以 30 次/min 的速度上下振荡 5 min,然后将每层筛面上的水稳性土壤团聚体分别洗入铝盒中,沉淀去除上层水,烘干称重。

1.3.2 指标计算

$$\begin{aligned}w_i &= \frac{m_i}{m} \times 100\% \\ \overline{d_i} &= \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2} \\ \text{MWD} &= \sum_{i=1}^n (\overline{d_i} w_i) \\ \text{GMD} &= \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \overline{d_i}}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \\ D &= 3 - \frac{\lg(\overline{d_i} / \overline{d_{\max}})}{\lg[m_{(\delta < d_i)} / m]} \\ R_{>0.25} &= 1 - \frac{m_{<0.25}}{m} \\ \text{PAD} &= \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \\ \text{WSAR} &= \frac{WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%\end{aligned}$$

式中: $\overline{d_i}$ 为*i*级土壤团聚体平均直径(mm); $N_{\max}$ 为某粒级上限; $N_{\min}$ 为某粒级下限;*n*为粒级数量; w_i 为

*i*级土壤团聚体占全土样的百分比(%); m_i 为*i*级土壤团聚体的重量(g); $\overline{d_{\max}}$ 为最大粒级土壤团聚体的平均直径(mm); $m_{(\delta < d_i)}$ 为粒径小于 $\overline{d_i}$ 的累积土壤团聚体质量(g); m 为全土样重量(g); $R_{>0.25}$ 为>0.25 mm 粒级团聚体所占比例(%)。PAD、WSAR 为土壤团聚体破坏率及稳定率(%); $DR_{0.25}$ 表示>0.25 mm 机械团聚体所占比重(%); $WR_{0.25}$ 表示>0.25 mm 水稳性团聚体所占比重(%)。

1.4 数据分析

采用 Sigmaplot 12.5 及 Excel 2019 软件进行图表制作,SPSS 19.0 软件进行数据统计与分析,并检验其显著性。

2 结果与分析

2.1 生物质炭施用对土壤团聚体分布的影响

2.1.1 机械土壤团聚体分布 通过干筛法测定不同处理各粒径所占比例(表 2)。B0N0 处理土壤团聚体主要以>5,2~5,0.5~1 mm 粒级为主,分别占 21.1%,25.3%,18.5%,而<0.25 mm 粒级的团粒仅占 10.1%;B0N1 处理土壤团聚体分布特征与 B0N0 处理规律相同。与 B0N1 处理相比,单施生物质炭各处理显著增加 2~5 mm 粒级团聚体含量($p<0.05$),分别增加 17.6%(B1N0),24.7%(B2N0),22.1%(B3N0);在氮肥配施生物质炭处理中,2~5 mm 粒级团聚体含量最高,与 B0N1 处理相比,B1N1、B2N1、B3N1 处理分别提高 26.1%,24.3%,30.5%,处理间差异显著($p<0.05$);而氮肥配施生物质炭与单施生物质炭相比,主要提高 0.5~1 mm 粒级团粒含量,较单施生物质炭总体增加 16.8%($p<0.05$)。

表 2 各处理机械土壤团聚体含量 单位:%

处理	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
ck(B0N0)	21.1±1.04a	25.3±0.35b	11.2±0.55b	18.5±0.81bc	13.8±0.55a	10.1±0.55a
B1N0	25.7±0.48b	26.6±0.47bc	9.0±0.90a	17.5±0.99b	13.1±5.59a	8.1±5.59a
B2N0	29.8±1.90c	28.2±1.93cd	9.2±0.62a	15.9±0.35a	10.6±3.13a	6.3±3.13a
B3N0	23.5±0.35b	27.6±0.71c	9.3±0.16a	17.8±0.38b	13.7±1.14a	8.1±1.14a
B0N1	24.9±0.95b	22.6±1.46a	11.4±0.44b	19.6±0.80cd	12.8±2.25a	8.7±2.25a
B1N1	19.1±1.74a	28.5±0.74cd	9.8±1.25ab	21.3±1.15de	13.2±4.75a	8.1±4.75a
B2N1	20.5±1.78a	28.1±0.80cd	10.0±0.97ab	20.3±0.38de	14.0±3.04a	7.1±3.04a
B3N1	24.2±0.82b	29.5±0.27d	10.1±0.46ab	18.2±0.72b	11.5±1.49a	6.5±1.49a
B(生物质炭)	ns	ns	*	ns	ns	ns
N(氮肥)	ns	ns	*	ns	ns	ns
B×N	* *	* *	ns	* *	ns	ns

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);*表示 $p<0.05$; * *表示 $p<0.01$;ns表示差异不显著。下同。

2.1.2 水稳性土壤团聚体分布 从表 3 可以看出,生物质炭添加影响不同处理水稳性土壤团聚体各粒级

占比。B0N0 处理土壤团聚体主要以 0.25~0.5 mm 及<0.25 mm 粒级为主,分别占 40.97%和 49.12%,而>5

mm 粒级的团粒仅占 0.64%;B0N1 处理土壤团聚体分布特征与处理规律相同。单施生物质炭各处理土壤团聚体分布有差异,与 B0N0 相比,单施生物质炭 B3N0 处理显著增加除<0.25 mm 粒外所有粒级团聚体含量($p<0.05$)。氮肥配施生物质炭处理中,0.25~0.5 mm 粒级团聚体含量最高,与 B0N1 处理相比分别提

高 6.2%(B1N1),10.03%(B2N1),9.4%(B3N1),处理间差异显著($p<0.05$),氮肥配施生物质炭与单施生物质炭相比,主要提高 0.5~1 mm 及 0.25~0.5 mm 粒级团粒含量,较单施生物质炭总体分别增加 4.4%和 22.2%($p<0.05$),且生物质炭与氮肥对土壤大团聚体的形成有互作效应,差异极显著。

表 3 各处理水稳性土壤团聚体含量

单位: %

处理	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	1~0.5 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
CK(B0N0)	0.64±0.09a	2.19±0.06a	2.69±0.72a	4.39±0.51a	40.97±2.40b	49.12±3.42c
B1N0	1.05±0.27ab	3.32±0.37b	3.80±0.40b	5.48±0.43ab	33.79±3.18a	52.55±3.09c
B2N0	1.71±0.12c	4.12±0.66c	4.15±0.20b	8.70±0.56cd	45.15±2.74c	36.17±2.89b
B3N0	2.24±0.25d	4.42±0.11c	4.39±0.51b	9.35±1.26de	54.58±1.49e	25.01±1.37a
B0N1	2.33±0.16d	3.43±0.18b	2.27±0.09a	7.60±0.59c	50.13±1.54d	34.24±1.54b
B1N1	1.46±0.21bc	3.25±0.26b	3.60±0.21b	6.36±0.17b	53.27±1.57d	32.06±1.57b
B2N1	1.52±0.38c	4.52±0.34c	6.36±0.17c	8.27±0.69cd	55.16±2.33e	24.17±2.82a
B3N1	2.36±0.31d	4.16±0.43c	6.29±0.65c	9.95±0.55e	54.86±0.36e	22.38±0.57a
B(生物质炭)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N(氮肥)	ns	ns	ns	ns	ns	*
B×N	* *	*	* *	* *	* *	* *

2.2 生物质炭施用对土壤团聚体稳定性的影响

由表 4 可知,不同处理干筛结果中土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和>0.25 mm 粒级土壤团聚体含量($R_{>0.25}$)均高于湿筛法。生物质炭添加后,干筛法和湿筛法下各处理 MWD、GMD 较对照均有所提高。干筛法下 B0N0 处理土壤团聚体含量最低,分别为 2.06,1.24 和 89.97%,单施生物质炭提高土壤团聚体 MWD、GMD,其中,B2N0 处理最高,分别较对照显著增加 21.3%,32.2%($p<0.05$);B0N1 处理与对照无显著差异,而生物质炭配

施氮处理中 B3N1 处理下团聚体 MWD、GMD 最大,较对照分别增加 10.6%和 20.1%,差异显著($p<0.05$)。湿筛法下各处理差异较干筛法明显,MWD、GMD 均随生物质炭量增加而增大。其中,B0N0 处理 MWD、GMD 最小,单施生物质炭 B3N0 处理土壤团聚体直径最大,分别较对照显著提高 60%(MWD),52%(GMD)和 46.7%($R_{>0.25}$)。氮肥配施生物质炭处理趋势与干筛法下表现趋势一致,且生物质炭与氮肥对土壤团聚体直径及>0.25 mm 粒级团聚体含量存在互作效应,差异显著($p<0.01$)。

表 4 各处理土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)及>0.25 mm 粒级($R_{>0.25}$)团聚含量

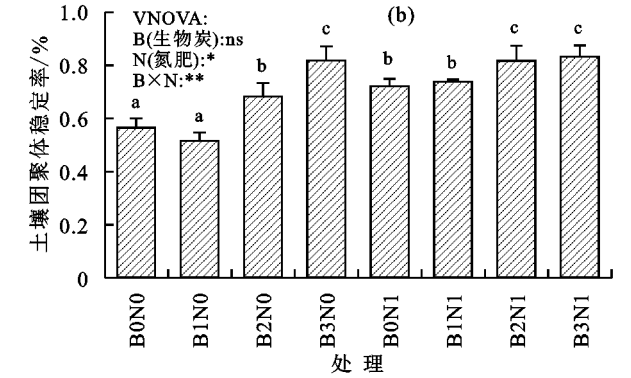
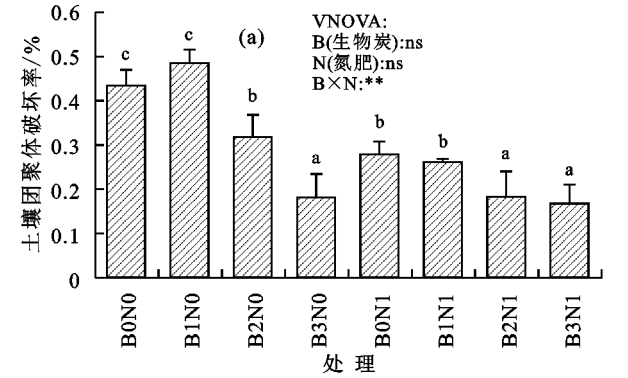
处理	干筛法			湿筛法		
	MWD/mm	GMD/mm	$R_{>0.25}$ / %	MWD/mm	GMD/mm	$R_{>0.25}$ / %
CK(B0N0)	2.06±0.04ab	1.24±0.03a	89.97±0.01a	0.40±0.02a	0.25±0.01a	50.88±3.42a
B1N0	2.27±0.03c	1.41±0.03ab	92.03±0.05a	0.46±0.02b	0.26±0.01a	47.45±3.09a
B2N0	2.50±0.11d	1.64±0.15c	93.67±0.03a	0.57±0.03d	0.33±0.01b	63.83±2.89b
B3N0	2.19±0.05bc	1.37±0.08ab	91.87±0.01a	0.64±0.01ef	0.38±0.01c	74.99±1.37c
B0N1	2.18±0.01bc	1.34±0.07ab	91.27±0.02a	0.56±0.01cd	0.32±0.01b	65.76±1.54b
B1N1	2.03±0.03a	1.28±0.03ab	91.97±0.04a	0.53±0.01c	0.32±0.01b	67.94±1.57b
B2N1	2.09±0.09ab	1.33±0.10ab	92.97±0.02a	0.63±0.02e	0.38±0.01cd	75.83±2.82c
B3N1	2.28±0.10c	1.49±0.16bc	93.43±0.01a	0.67±0.02f	0.40±0.01d	77.62±0.57c
B(生物质炭)	ns	ns	ns	ns	*	ns
N(氮肥)	ns	ns	ns	ns	*	*
B×N	* *	* *	ns	* *	* *	* *

图 1 为各处理土壤团聚体破坏率(PAD)和团聚体稳定率(WASR)表现趋势,各处理土壤团聚体破坏率(PAD)随生物质炭量增加而减小,土壤团聚体稳

定率(WASR)则随生物质炭量增加呈上升趋势。单施生物质炭时,B3N0 处理土壤团聚体破坏率最低,为 18.1%,较对照显著降低 58.1%,团聚体稳定率最

高,为 81.9%,较对照显著提升 44.6%($p<0.05$)。氮肥配施生物质炭各处理土壤团聚体破坏率及稳定率表现趋势与单施生物质炭各处理一致,B3N1 处理土

壤团聚体破坏率最低,稳定率最高。且生物质炭与氮肥对土壤团聚体破坏率及稳定率有互作效应,差异显著($p<0.01$)。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$;ns表示差异不显著。下同。

图 1 不同处理土壤团聚体破坏率和稳定率

2.3 生物质炭施用对土壤团聚体分形特征的影响

从图 2 可以看出,干筛法各处理分形维数均低于湿筛法。机械土壤团聚体分形维数在 1.8~2.1,单施生物质炭 B2N0 处理分形维数最低,较对照显著降低 13.8% ($p<0.05$)。氮肥配施生物质炭时,分形维数随生物质炭量增加而减小,B3N0 处理分形维数最低,较对照降低

6.7%,差异显著($p<0.05$)。水稳性土壤团聚分型维数在 2.6~2.8,单施生物质炭与炭氮配施趋势一致,均表现为分形维数随生物质炭量增加而降低,B3 生物质炭量下分形维数最低,分别为 2.63(B3N0)和 2.64(B3N1),分别较对照降低 3.3%和 2.9%,生物质炭与氮肥对土壤团聚体分形维数互作效应显著($p<0.01$)。

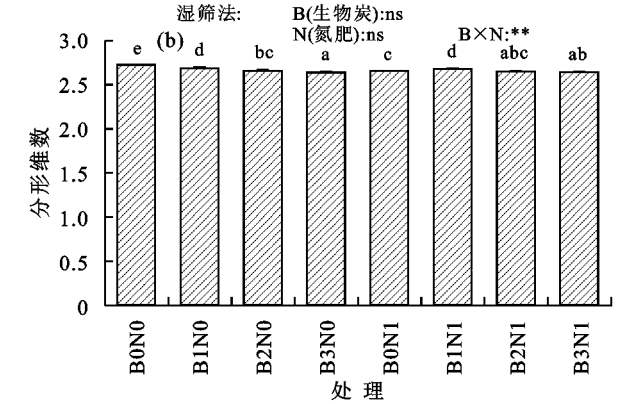
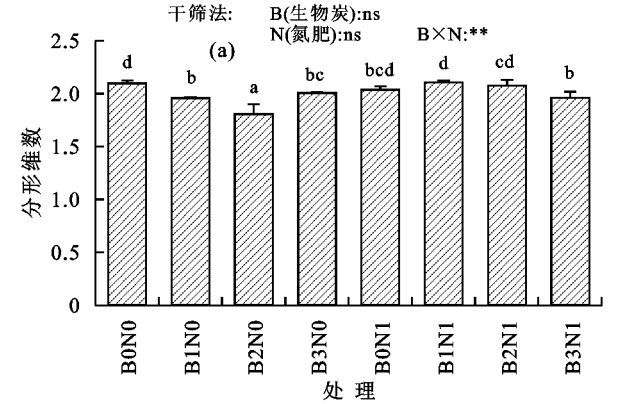
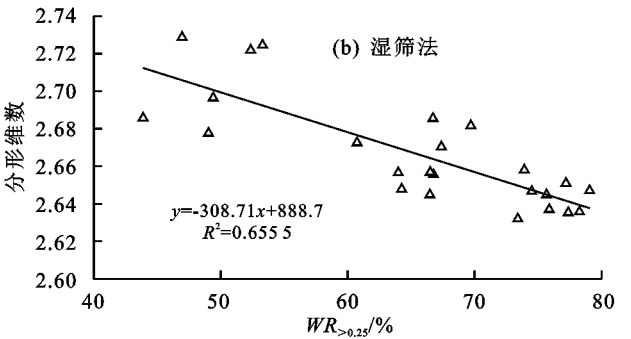
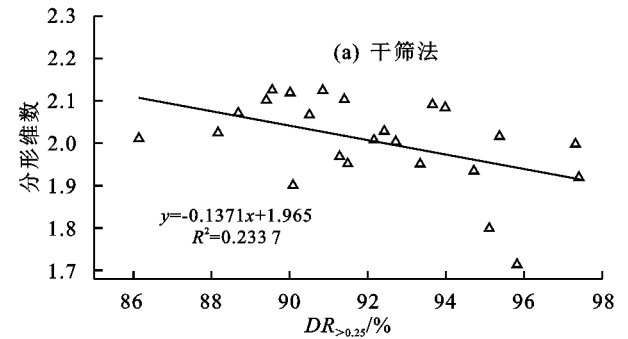


图 2 不同处理土壤团聚体分形维数

2.4 分形维数与>0.25 mm 土壤团聚体含量的关系

通过对土壤团聚体分形维数与>0.25 mm 团聚含量间关系分析(图 3)可知,土壤团聚体分形维数均与>0.25 mm 土壤团聚体含量($DR_{>0.25}$ 、 $WR_{>0.25}$)呈显著负相关关系($p<0.05$),表明干筛法和湿筛法分

形维数均随着与 $DR_{>0.25}$ 和 $WR_{>0.25}$ 的增大而减小,干筛法,湿筛法 R^2 分别为 0.233 7,0.655 5,线性关系良好,说明生物质炭添加增加了>0.25 mm 土壤团聚体含量,能有效改善土壤结构,防止土壤板结。



注:图中 $DR_{>0.25}$ 为>0.25 mm 机械土壤团聚体; $WR_{>0.25}$ 为>0.25 mm 水稳性土壤团聚体。

图 3 土壤团聚体分形维数与>0.25 mm 土壤团聚体含量间的相关性

3 讨论

新疆气候干旱,降水量少,蒸发量大,灰漠土分布广,氮肥用量大,土壤有机质含量低^[15]。生物质炭施用能增加土壤有机质含量,改善土壤结构,同时还能增加水的黏度,从而增强土壤团聚能力^[16]。本研究采用干筛法和湿筛法相结合的方式对试验土壤样品进行处理发现,干筛法所得机械土壤团聚体主要以 >5 , $2\sim5$, $0.5\sim1$ mm 粒级为主,占土壤样品总质量的 60% 以上,而湿筛法结果与干湿法相反,随着团聚体粒径减小,团聚体含量不断增加,各处理水稳性团聚体均以 $0.25\sim0.5$ mm 及 <0.25 mm 为主,占总试样 70% 以上,说明湿筛法能更好地模拟大田条件,比干筛法更具代表性^[4,17]。生物质炭在土壤团聚体形成过程中可能发挥主要作用^[18],2 种筛分方式下,不同处理各粒级土壤团聚体分布趋势基本一致,与对照相比生物质炭施用显著提高 >0.25 mm 团聚体所占比例, <0.25 mm 微团聚体百分比显著降低($p<0.05$)。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)和稳定率(WASR)反映土壤团聚体的团聚程度,MWD、GMD、WASR 值越大,说明团聚度高,土壤团聚体稳定性越好,PAD 值越大,说明土壤结构稳定性越差,退化越严重^[2,19-20]。本研究表明,干筛法下 MWD、GMD 均高于湿筛法,这是由于物理作用,包括根系固结能力及机械外力,使土壤变得紧实^[21],土壤团聚体水稳性差,所以湿筛后土壤微团聚体数量增多,从而导致 MWD、GMD 减小。单施生物质炭时,干筛法和湿筛法下各处理 MWD、GMD 较对照均有所提高,与对照相比差异显著($p<0.05$),说明生物质炭可在一定程度上提高土壤团聚体稳定性,同时也受土壤有机质水平影响,土壤有机质含量越高,土壤 MWD、GMD 越大^[22-23],而生物质炭与土壤混合后,可增加土壤中离子交换能力和持水能力,从而改善土壤质量,增加土壤有机质含量^[24]。各处理 PAD 值随生物质炭量增加而减小,WASR 值随生物质炭量增加呈上升趋势,生物质炭量为 B3(30 t/hm^2)时,PAD 值最小,较对照显著降低 58.1%,WASR 值最大,较对照显著提升 44.6%($p<0.05$),再次证明生物质炭有利于稳定土壤结构^[25]。土壤颗粒间的相互作用主要受土壤内、外因素影响,包括离子交换能力、土壤比表面积及其表面电荷密度^[26-27],生物质炭添加后,土壤离子交换能力、比表面积及电荷密度增加,加强土壤颗粒之间的吸引力,从而使土壤团聚体结构更加稳定^[28]。单施氮肥时,MWD、GMD 及 WASR 较对照也有所增加,MWD、GMD 在湿

筛条件下达到显著水平,生物质炭配施氮肥时,生物质炭量越大,MWD、GMD 及 WASR 越大,土壤稳定性越强,且生物炭配施氮肥效果优于生物炭或氮肥单施。生物质炭多孔性及表面积大可为微生物提供活动空间,氮肥为其营养源,增加土壤中微生物活性^[29],尤其是对真菌的繁殖非常有利^[30],其丝状生长特性对稳定土壤结构及提高作物产量的作用不可忽视^[31]。另一方面,生物质炭可提高氮肥利用效率,促进作物生长,增加光合有效辐射,有利于作物固碳,后以根系分泌物形式为土壤微生物提供碳源^[32],微生物代谢产物可黏结土壤颗粒,有利于土壤团聚作用,增强土壤结构稳定性^[33]。

分形维数(D)是评价土壤结构的新型指标,可表达土壤颗粒大小,也能反映土壤质地的均匀与否, D 值越大,土壤质地越细,通透性越差;相反, D 值越小,说明土壤结构越好,土壤通透性越强^[34]。本研究结果表明,干筛法与湿筛法分形维数(D)值相似,干筛法下各处理 D 值均低于湿筛法,随着生物质炭量增加 D 值不断减小,主要原因是干筛法分形维数计算时 2 种土壤团聚体混杂在一起,反映水稳性团聚体与非水稳性团聚体的综合情况,而湿筛法分形维数只考虑水稳性团聚体,所以较干筛法可以更直观地反映生物质炭对土壤结构的影响。

4 结论

在本试验条件下,生物质炭添加显著增加土壤大团聚体含量,并提高土壤团聚体稳定性,生物质炭添加量为 30 t/hm^2 时土壤团聚体稳定性最佳,湿筛法较干筛法能更好地模拟大田环境,更真实反映大田中土壤团聚体分布及其稳定性。

参考文献:

- [1] 朱家琪,满秀玲,王飞.我国寒温带四种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究[J].土壤通报,2020,51(3):606-613.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.
- [5] 吴宪,张婷,王蕊,等.化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响[J].生态环境学报,

- 2020,29(5):933-941.
- [6] Hg A, Yla B, Sl A. Effects of the interaction between biochar and nutrients on soil organic carbon sequestration in soda saline-alkali grassland: A review[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01449.
- [7] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- [8] 龙杰琦,姚婷,苗淑杰,等.生物炭对侵蚀黑土团聚体的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 76-80.
- [9] 史登林,王小利,段建军,等.氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4117-4124.
- [10] 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.
- [11] 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 and Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.
- [12] 魏永霞,肖敬萍,王鹤,等.施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 305-314.
- [13] 王亚琼,牛文全,李学凯,等.生物炭对日光大棚土壤团聚体结构的影响[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 190-195.
- [14] 孙涛,孙约兵,贾宏涛,等.虾壳生物炭对 Cd-As 复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(8): 1675-1685.
- [15] 顾美英,刘洪亮,李志强,等.新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4128-4138.
- [16] 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, 2016.
- [17] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 104(5): 228-231.
- [18] 何玉亭,王昌全,沈杰,等.两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2333-2342.
- [19] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 129-135.
- [20] Schaffer B, Attinger W, Schulin R. Compaction of re-stored soil by heavy agricultural machinery-soil physical and mechanical aspects [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 28-43.
- [21] 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, 168(3): 274-281.
- [22] 刘哲,张扬,雷娜,等.优化施肥方式对黄土高原新增耕地土壤有机质含量和团聚体特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 99-106.
- [23] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793.
- [24] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248-253.
- [25] 李伟,代镇,张光鑫,等.生物炭和氮肥配施提高土团聚体稳定性及作物产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 782-791.
- [26] 王磊,应蓉蓉,石佳奇,等.土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 805-818.
- [27] Rengasamy P, Tavakkoli E, McDonald G K. Exchangeable cations and clay dispersion: Net dispersive charge, a new concept for dispersive soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(5): 659-665.
- [28] Hu F, Xu C, Ma R, et al. Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: Based on a two-year field study[J]. *Geoderma*, 2021, 403: e115276.
- [29] 王博,刘扣珠,任天宝,等.减氮条件下生物炭对烤烟根系发育及土壤微生物群落的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(3): 45-50.
- [30] Hao Z, Xiao W, Luo X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: Roles of soil aggregation and microbial modulation[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 610: 951-960.
- [31] Lehmann A, Rillig M C. Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: A way forward with saprobic fungi[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 298-302.
- [32] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298-310.
- [33] 李娜,韩晓增,尤孟阳,等.土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1625-1632.
- [34] 王志强,刘英,杨文亨,等.稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1143-1155.