

采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应

何冰¹, 李廷亮^{1,2}, 栗丽¹, 高继伟¹, 焦欢¹, 李彦¹, 李顺¹

(1. 山西农业大学资源与环境学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801)

摘要: 为了揭示长期不同培肥措施下采煤塌陷区复垦土壤团聚体有机碳氮含量的变化规律, 通过干筛法研究了不施肥(CK)、单施有机肥(M)、单施化肥(CF)、有机肥与化肥配施(MCF)、生物有机肥与化肥配施(MCFB)5种培肥措施下复垦4年和8年土壤各粒级团聚体分布组成特征以及各团聚体有机碳氮含量的变化规律。结果表明, 复垦土壤团聚体含量随粒级减小呈先减小后增大的变化趋势, 其中以3~2 mm粒级团聚体含量最低, 占团聚体总量2%~3%, 以2~1 mm粒级团聚体含量最高, 占团聚体总量25%~31%。不同培肥措施下复垦4年和8年土壤团聚体分布特征无明显差异, 但较未复垦生土明显降低了>7 mm和7~5 mm团聚体含量。复垦8年土壤的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)高于复垦4年土壤, 分形维数(D)值低于复垦4年土壤。各培肥处理间以单施有机肥MWD、GMD值最高, D值最低。各培肥处理土壤团聚体有机碳氮含量随粒径减小递增, 以0.5~0.25 mm粒径团聚体最高, 而有机碳储量以2~1 mm粒级团聚体最高, 分别占24.2%~33.8%和17.0%~33.1%。各处理间有机碳氮含量以单施有机肥处理最高, 但不同处理间有机碳氮储量无显著差异。总体表明, 采煤塌陷区复垦4年和8年土壤团聚体分布特征及碳氮储量无明显变化, 单施有机肥可提高复垦土壤团聚体有机碳氮含量及团聚体稳定性。

关键词: 复垦土壤; 团聚体; 有机碳; 全氮

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0184-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.029

Response of Carbon and Nitrogen Distribution of Reclaimed Soil Aggregates to Fertilizers in Coal Mining Subsidence Area

HE Bing¹, LI Tingliang^{1,2}, LI Li¹, GAO Jiwei¹, JIAO Huan¹, LI Yan¹, LI Shun¹

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to reveal the changes of organic carbon and nitrogen content of reclaimed soil aggregates in coal mining subsidence areas under long-term fertilization measures, we examined the characteristics of soil aggregates distribution and the changes of organic carbon and nitrogen contents in 4 years and 8 years of reclamation soil under five fertilization measures, which were non-fertilizer (CK), single application of manure fertilizer (M), single application of chemical fertilizer (CF), manure fertilizer and chemical fertilizer (MCF), biological organic fertilizer and chemical fertilizer mixed fertilizer (MCFB). The results showed that the content of reclaimed soil aggregates first decreased and then increased with the decreasing of grain size, in which the content of aggregates with the size of 3~2 mm was the lowest, accounting for 2%~3% of the total aggregates, and the content of aggregates with the size of 2~1 mm was the highest, accounting for 25%~31%. There was no significant difference in the distribution characteristics of soil aggregates between the 4 years and 8 years of reclamation under different fertilization measures, but the contents of 7~5 mm and >7 mm aggregates significantly decreased compared with unreclaimed raw soil. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the 8 years reclamation soil were both higher than those of 4 years, while the fractal dimension (D) value was lower than that of 4 years. The MWD and GMD values of M treatment were the highest, but the D of it was the lowest. The contents of organic carbon and nitrogen in soil aggregates increased with the decreasing of soil aggregate size in reclaimed soil. The aggregates with the size of 0.5~0.25 mm were the highest, while the organic carbon and nitrogen storages in the aggregates with the

收稿日期: 2018-03-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401342)

第一作者: 何冰(1993—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail: 15200031194@163.com

通信作者: 李廷亮(1982—), 男, 山西大同人, 博士, 副教授, 主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail: litingliang021@126.com

size of 2~1 mm were the highest, accounting for 24.2%~33.8% and 17.0%~33.1%, respectively. Organic carbon and nitrogen contents were the highest in M treatment, but there was no significant difference in the storages of organic carbon and nitrogen between different treatments. Thus, there was no significant change in the distribution characteristics of soil aggregates and carbon and nitrogen reserves in the 4 years and 8 years reclaimed lands of coal mining subsidence area. The application of manure fertilizer could increase the organic carbon and nitrogen content and the stability of the reclaimed soil aggregates.

Keywords: reclaimed soil; aggregates; organic carbon; total nitrogen

土壤结构是维持土壤功能的基础,团聚体在土壤中起到协调水、肥、气和热的作用,是影响土壤肥力状况的重要因素^[1]。土壤有机碳作为衡量土壤肥力的重要指标,在促进土壤养分循环及其有效性等方面具有重要作用。同时显著影响着土壤团聚体组成及团聚体有机碳氮含量分布^[2-3]。矿山开采活动对矿区土壤造成了严重破坏,主要表现为土壤有机碳氮库容量和肥力降低,理化和生物特性变差,土壤团聚体遭受严重破坏^[4-5]。研究长期施肥条件下土壤团聚体有机碳氮的含量及分布变化,有助于理解施肥影响有机碳氮固存机制的差异变化,前人关于施肥对土壤团聚体组成和有机碳氮含量及分布的影响已有许多报道。刘京等^[6]发现施用有机肥增加了>0.25 mm大团聚体,降低了<0.01 mm团聚体;王仁杰等^[7]研究认为瘠土中大于50%的有机碳储存在<0.25 mm的微团聚体中,1~2 mm团聚体储存最少,其中长期有机无机肥配施降低了>2 mm和<0.25 mm团聚体有机碳分配比例;谭秋锦等^[8]研究认为不同生态系统下各粒径团聚体土壤有机碳含量均以0.053~0.25 mm粒径最高,>5 mm粒径含量最低,但以>5 mm团聚体对土壤有机碳的贡献率最高,且贡献率随着粒径的减小逐渐降低;孙天聪等^[9]研究表明耕层土壤不同粒径有机质、全氮含量差异较大,呈现出较强的规律性,表现为1~0.25 mm 粒级团聚体中的含量最高。总体来看各学者研究结果不尽一致,可能与土壤性质、施肥量、气候以及作物体系等因素有关。为了进一步反映土壤团聚体分布状况和稳定性特征,研究者们先后提出了平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)等土壤团聚体稳定性指数,这些指数可作为团聚体稳定性的评价指标^[10]。不同粒级团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物活动具有不同的作用,MWD和GWD值越大,表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强,土壤肥力越高^[11-12]。土壤团粒结构粒径分布的分形维数反映了团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构粒径分布的分形维数越小,则土壤结构与稳定性越好,抗蚀能力越强^[13]。有研究^[14]指出长期施肥有利于增加土壤>0.25 mm的干筛或湿筛团聚体含量和MWD值,降低D值,提升团聚体

稳定性。当前研究多侧重于较为肥沃的土壤,以及不同生态系统、不同耕作措施下的团聚体特征的探讨,对相对贫瘠的矿区土壤研究较少,尤其是就施肥对复垦土壤团聚体组成及其有机碳氮的含量及变化特征研究较为缺乏。因此本研究依托复垦土壤长期定位试验基地,侧重探讨采煤塌陷区复垦土壤的团聚体数量组成及其有机碳氮库分布特征,系统分析不同复垦年限和培肥措施对土壤团聚体组成及团聚体有机碳氮分布的影响,为明确矿区复垦土壤碳氮固存机制及土壤肥力提升提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期定位试验基地位于襄垣县洛江沟采煤塌陷区,地处山西省襄垣县(36°28'11.95"N, 113°00'52.57"E),该区海拔970 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温9.5℃,年均降水量532.8 mm,无霜期平均166 d。试验区土地复垦方式以混推模式为主,利用挖深垫浅、就地平整法复垦,自2009年起通过不同施肥方式及连续种植玉米进行培肥熟化土壤。试验区玉米秸秆全部还田。复垦4,8年土壤分别于2013,2009年开始培肥熟化复垦。

1.2 试验设计

试验设置5种培肥措施,研究不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤肥力提升的影响。主要为:不施肥(CK)、化肥(CF)、有机肥(M)、有机肥+化肥(MCF)和生物有机肥+化肥(MCFB)。另取未复垦生土(RS)和周边未破坏多年种植熟土(US)作为培肥效果参照,除不施肥外,其余各处理养分供应量相同,具体见表1。每个处理重复3次,完全随机区组设计。试验供试有机肥为鸡粪,含有机质:25.8%,N:1.68%,P₂O₅:2.46%,K₂O:1.35%;供试菌肥是将拉恩式菌、假单胞菌1、假单胞菌2制成混合磷细菌菌液后,与鸡粪按照1:9的比例混匀,其活菌数≥0.5×10⁸ CFU/g。

1.3 样品采集与分析

本研究土壤样品于2017年4月玉米播种前采集,每个小区随机采集3个原状耕层土样置于硬质塑料盒中,同时采集未复垦的生土(RS)和周边未破坏农民多年种植的熟土(US)作为培肥效果参照,将原

状土样带回实验室后,置于室温下风干,用于土壤团聚体的分离。

表 1 不同施肥处理的施肥用量

处理	单位: kg/hm ²				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥	磷细菌肥
对照(CK)	0	0	0	0	0
化肥(CF)	201.5	184.8	98.4	0	0
有机肥(M)	0	0	0	12000	0
有机肥+化肥(MCF)	100.8	92.4	49.2	6000	0
生物有机肥+化肥(MCFB)	100.8	92.4	49.2	5250	750

土壤团聚体测定方法选取干筛法。样品在风干过程中,将其沿自然断裂面掰成 1 cm 左右的土块,并挑出砾石、侵入体及植物残根等。将部分土壤样品过 2 mm 筛用来测定土壤碳氮含量。

将风干土样置于孔径依次为 7.00, 5.00, 3.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 的套筛顶部,以 30 次/min 手工振荡 5 min,制备成粒径 >7.00, 7~5.00, 5~3.00, 3~2.00, 2~1.00, 1~0.50, 0.5~0.25 mm 的土壤团聚体,分别称重,计算各级别机械稳定性团聚体的百分含量。各粒径团聚体中有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定;全氮含量采用凯氏消煮法测定^[15]。

$$Q_i(\%) = \frac{C_i W_i}{\sum_{i=1}^n (C_i W_i)} \times 100\% \quad (1)$$

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)以及分形维数(fractal dimension, D)的计算公式分别为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left[\sum_{i=1}^n (\ln x_i w_i)\right] \quad (3)$$

$$\frac{W(\delta - \bar{d}_i)}{\omega_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

式(1)中: Q_i 是第 i 级团聚体碳(氮)储量百分比(%); C_i 为第 i 级团聚体碳(氮)含量(g/kg); W_i 为第 i 级团聚体重量百分数(%). 式(2)和式(3)中: x_i 为第 i 个筛子上团聚体直径(mm); w_i 为第 i 个筛子上团聚体重量百分比(%). 式(4)中: \bar{d}_i 为某级团聚体平均直径(mm); $W(\delta - \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 \bar{d}_i 的团聚体质量; ω_0 为团聚体总质量; \bar{d}_{\max} 为团聚体的最大粒径(mm)。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 软件对数据进行整理制图,采用 DPS 软件进行数据处理以及 LSD 法检验各处理间差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对复垦土壤团聚体分布特征的影响

采煤塌陷区复垦土壤各粒级团聚体含量总体表现为 2~1 > 1~0.5, 0.5~0.25 > 5~3 > 7 > 7~5 > 3~

2 mm(图 1),以 2~1 mm 粒级团聚体含量最高,占团聚体总量 25%~31%,以 3~2 mm 团聚体含量最低,占团聚体总量 2%~3%。复垦 4 年和复垦 8 年土壤团聚体含量无明显变化,但不同培肥措施下复垦土壤较未复垦生土明显降低了 >7 mm 和 7~5 mm 团聚体含量,降低幅度分别为 64%~91%和 29%~66%,明显提高了 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25 mm 团聚体含量,分别提高 0.6~1.2, 1.3~2.6, 1.6~3.1 倍。与周边农田熟土相比,主要表现降低了 5~3 mm 团聚体含量,提高了 1~0.5 mm 团聚体含量。

不同培肥处理之间团聚体含量没有明显变化规律,从不同培肥处理同一粒级团聚体含量变异系数来看,以 >7 mm 团聚体最高,复垦 4 年和 8 年分别为 45.3%和 26.0%,主要表现为单施有机肥处理高于其他处理。以 2~1 mm 团聚体含量变异系数最低,复垦 4 年和 8 年分别为 6.8%和 4.2%,其他粒级团聚体含量的变异系数变化不大。

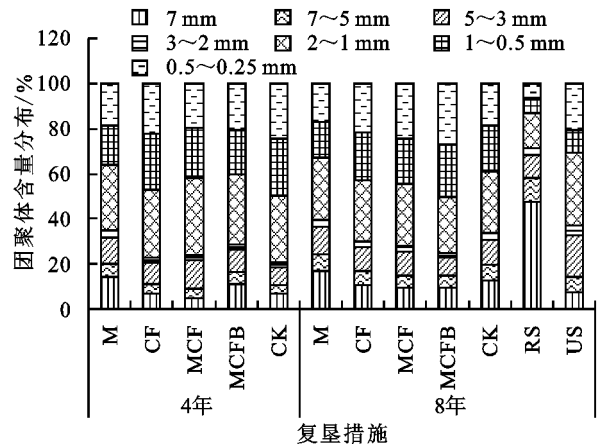


图 1 不同复垦措施对土壤团聚体分布特征的影响

2.2 不同培肥措施对复垦土壤团聚体稳定性的影响

土壤 MWD 和 GMD 总体表现为复垦 8 年 > 复垦 4 年 > 生土,土壤分形维数总体表现为复垦 8 年 < 复垦 4 年 < 生土,表明随复垦年限增加,土壤团聚体稳定性增加(表 2)。各施肥处理对土壤 MWD、GMD 和 D 值具有一定影响,其中 M 处理的 MWD 和 GMD 值均为最高, D 值最低。复垦土壤 M 处理 MWD 和 GMD 值较不施肥对照处理分别提高了 42.9%~93.1% ($P < 0.05$) 和 13.5%~36.2% ($P < 0.05$),说明相同养分供应条件下,单施有机肥对土壤结构具有一定的提升作用,有利于提高土壤的团聚稳定性。而不同施肥处理间单施化肥处理的 MWD 和 GMD 值总体偏低, D 值最高,分别为 1.89~2.26, 1.23~1.42 和 2.53~2.68,其他处理之间差异不显著。

2.3 不同培肥措施对复垦土壤团聚体有机碳的影响

由表 3 可知,随土壤团聚体粒级逐渐减少,复垦 4 年和 8 年土壤的 M、MCF 和 MCFB 处理均表现为

逐渐增加的趋势,以 0.5~0.25 mm 粒级有机碳含量最高,其他处理不同粒级之间有机碳含量无明显变化。不同培肥处理间以 M 处理的各粒级团聚体有机碳含量最高,且复垦 8 年土壤高于复垦 4 年土壤,为 9.05~10.99 g/kg,较未复垦生土高 1.6~2.1 倍,较周边未塌陷农田土壤低 33.5%~40.0%。

各培肥处理有机碳储量以 2~1 mm 粒级团聚体最高,占 24.2%~33.8%(表 4),其次为 0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm,以 3~2 mm 粒级团聚体有机碳储量最低,占 2.0%~3.3%。不同培肥处理下各粒级有机碳储量总体无显著差异,只有 M 处理下 >7 mm 粒级团聚体有机碳储量高于其他处理。但经过多年培肥复垦,各处理较生土明显降低了 7~5 mm 粒级团聚体有机碳储量,提高了 2~1,1~0.5,0.5~

0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量。

表 2 不同复垦措施下土壤团聚体稳定性指标

复垦年限/a	处理	MWD	GMD	D
4	M	2.53a	1.58a	2.47
	CF	1.89c	1.23bc	2.53
	MCF	2.03bc	1.46ab	2.47
	MCFB	2.23ab	1.40ab	2.51
	CK	1.77c	1.16c	2.56
8	M	2.80a	1.77a	2.44
	CF	2.26b	1.42ab	2.68
	MCF	2.12b	1.31b	2.52
	MCFB	2.00b	1.20b	2.61
	CK	1.45c	1.56ab	2.48
RS	1.46	1.15	2.69	
US	2.41	5.70	2.46	

注:不同小写字母表示相同粒级不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 3 不同复垦措施下土壤团聚体有机碳含量

单位:g/kg

复垦年限/a	处理	>7 mm	7~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
4	M	7.76±0.98a	7.77±0.95a	7.78±1.47a	7.79±1.42a	7.80±0.66a	7.81±0.84a	7.82±1.13a
	CF	5.92±0.81a	6.14±1.36ab	5.63±1.28ab	6.40±0.8ab	6.28±0.97b	6.89±2.01ab	6.68±1.00bc
	MCF	5.84±1.85a	4.73±1.393b	4.85±1.70b	6.69±0.48ab	6.42±1.36ab	6.72±0.29b	8.17±0.92ab
	MCFB	5.89±0.96a	5.54±0.42b	5.86±0.84ab	7.04±1.21ab	6.97±1.34ab	7.43±1.60ab	8.50±2.16ab
	CK	5.84±0.38a	5.38±0.55b	5.22±0.21b	5.66±0.82b	5.17±1.14b	5.61±0.97b	5.59±0.68c
8	M	9.06±0.26a	9.05±0.37a	9.21±1.49a	10.25±1.53a	10.44±2.01a	9.97±0.58a	10.99±2.86a
	CF	8.95±1.33ab	8.23±1.28a	8.65±1.73a	8.76±1.09ab	8.07±1.43b	8.07±1.29bc	8.54±1.53ab
	MCF	7.22±1.10c	7.99±2.61a	8.23±1.91a	8.17±1.12b	7.82±0.48b	8.49±0.32b	9.00±0.23ab
	MCFB	7.23±0.47bc	7.95±1.21a	7.61±0.53a	7.60±0.21b	7.78±0.34b	7.90±0.48bc	8.81±0.66ab
	CK	7.31±1.10bc	6.96±0.47a	7.68±1.15a	7.54±1.16b	7.17±0.63b	6.89±0.94c	7.63±1.30b
RS	3.44±0.16	3.38±0.22	3.48±0.28	3.43±0.32	3.54±0.41	3.52±0.46	3.54±0.09	
US	14.16±1.45	14.99±1.12	15.60±1.06	16.53±2.78	15.52±1.41	15.90±1.76	16.52±2.57	

表 4 不同复垦措施下土壤团聚体有机碳储量

单位:%

复垦年限/a	处理	>7 mm	7~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
4	M	13.00	4.92	10.22	3.19	27.87	18.86	21.95
	CF	6.38	4.10	8.16	2.39	29.26	26.49	23.22
	MCF	3.92	3.07	9.32	2.08	33.77	23.38	24.45
	MCFB	9.00	4.09	8.53	2.47	30.48	20.83	24.61
	CK	7.72	3.49	7.48	2.02	28.08	26.03	25.17
8	M	15.79	6.83	10.96	3.28	28.73	16.11	18.30
	CF	11.61	5.86	11.13	2.89	26.20	20.41	21.91
	MCF	8.72	4.67	9.94	2.54	24.85	20.55	28.72
	MCFB	8.66	5.06	7.78	1.99	24.18	22.55	29.78
	CK	13.00	6.07	11.89	3.24	27.01	19.45	19.33
RS	0.54	45.00	11.58	9.51	3.13	17.08	6.98	
US	1.62	6.52	6.73	18.53	4.51	31.82	10.09	

2.4 不同培肥措施对复垦土壤团聚体全氮的影响

不同培肥处理对复垦土壤团聚体全氮的影响与有机碳的变化趋势一致,总体表现为随粒级减小全氮含量逐渐增加(表 5)。各处理均以 0.5~0.25 mm 粒级团聚体全氮含量最高,在 0.41~0.89g/kg。复垦 8 年土壤全氮含量总体高于复垦 4 年土壤,各施肥处理团聚体全氮含量均高于不施肥处理,其中以 M 处理全氮含量最高。复垦 8 年土壤的 M 处理各粒级

团聚体全氮含量在 0.69~0.89 g/kg,较未复垦生土提高了 2.1~5.3 倍,接近周边未破坏农田熟土的氮素水平。

各处理下不同复垦年限土壤团聚体总体以 2~1 mm 粒径全氮储量最大(表 6),占 17.0%~33.1%。以 3~2 mm 粒径全氮储量最小,占 1.9%~4.7%。各处理之间不同粒径土壤氮储量总体无显著差异,只有 M 处理下 >7 mm 粒级团聚体有机氮储量高于其

他处理。各处理较未复垦生土相比显著降低了 >7 mm 粒径氮储量,提高了 $2\sim 1, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25$ mm 粒径团聚体有机氮储量,与开垦多年熟土相比降低了 $5\sim 3$ mm 粒径团聚体氮储量。

表 5 不同复垦措施下土壤团聚体全氮含量

单位: g/kg

复垦年限/a	处理	>7 mm	$7\sim 5$ mm	$5\sim 3$ mm	$3\sim 2$ mm	$2\sim 1$ mm	$1\sim 0.5$ mm	$0.5\sim 0.25$ mm
4	M	$0.55\pm 0.08a$	$0.57\pm 0.27a$	$0.57\pm 0.07a$	$0.60\pm 0.22a$	$0.64\pm 0.14a$	$0.66\pm 0.23a$	$0.72\pm 0.04ab$
	CF	$0.46\pm 0.07a$	$0.50\pm 0.06a$	$0.53\pm 0.03a$	$0.57\pm 0.07a$	$0.55\pm 0.08a$	$0.60\pm 0.04a$	$0.59\pm 0.15b$
	MCF	$0.58\pm 0.06a$	$0.55\pm 0.16a$	$0.55\pm 0.16a$	$0.58\pm 0.07a$	$0.61\pm 0.15a$	$0.69\pm 0.16a$	$0.71\pm 0.08ab$
	MCFB	$0.54\pm 0.07a$	$0.45\pm 0.08a$	$0.54\pm 0.07a$	$0.59\pm 0.15a$	$0.61\pm 0.33a$	$0.68\pm 0.09a$	$0.78\pm 0.02a$
	CK	$0.45\pm 0.08a$	$0.50\pm 0.14a$	$0.47\pm 0.10a$	$0.55\pm 0.22a$	$0.55\pm 0.08a$	$0.57\pm 0.07a$	$0.41\pm 0.09c$
8	M	$0.69\pm 0.22a$	$0.75\pm 0.22a$	$0.83\pm 0.30a$	$0.74\pm 0.30a$	$0.77\pm 0.12a$	$0.88\pm 0.22a$	$0.89\pm 0.05a$
	CF	$0.61\pm 0.05a$	$0.68\pm 0.09a$	$0.67\pm 0.12ab$	$0.69\pm 0.22a$	$0.73\pm 0.11a$	$0.69\pm 0.22a$	$0.72\pm 0.17ab$
	MCF	$0.64\pm 0.25a$	$0.69\pm 0.3a$	$0.60\pm 0.22ab$	$0.71\pm 0.19a$	$0.74\pm 0.36a$	$0.79\pm 0.38a$	$0.82\pm 0.11ab$
	MCFB	$0.60\pm 0.16a$	$0.69\pm 0.08a$	$0.61\pm 0.23ab$	$0.66\pm 0.12a$	$0.72\pm 0.07a$	$0.62\pm 0.12a$	$0.76\pm 0.09ab$
	CK	$0.50\pm 0.14a$	$0.58\pm 0.18a$	$0.36\pm 0.256b$	$0.45\pm 0.16a$	$0.48\pm 0.12a$	$0.55\pm 0.22a$	$0.66\pm 0.04b$
	RS	0.14 ± 0.08	0.18 ± 0.14	0.14 ± 0.08	0.21 ± 0.12	0.21 ± 0.29	0.14 ± 0.08	0.29 ± 0.04
	US	0.67 ± 0.16	0.71 ± 0.10	0.71 ± 0.10	0.86 ± 0.30	0.79 ± 0.20	0.86 ± 0.10	0.92 ± 0.10

表 6 不同复垦措施下复垦土壤团聚体全氮储量百分比

单位: %

复垦年限/a	处理	>7 mm	$7\sim 5$ mm	$5\sim 3$ mm	$3\sim 2$ mm	$2\sim 1$ mm	$1\sim 0.5$ mm	$0.5\sim 0.25$ mm
4	M	12.62	4.94	10.19	3.18	29.13	18.16	21.77
	CF	5.15	3.80	8.85	2.38	29.32	26.78	23.73
	MCF	3.96	3.72	11.15	1.93	33.12	24.07	22.05
	MCFB	9.32	3.55	8.65	2.05	28.73	21.26	26.43
	CK	6.37	3.34	7.11	2.29	32.53	28.58	19.79
8	M	14.75	6.63	12.63	3.01	26.95	17.52	18.51
	CF	9.53	5.77	9.93	2.95	28.59	20.98	22.25
	MCF	8.70	4.48	8.49	2.47	26.27	19.92	29.67
	MCFB	8.53	5.10	7.14	2.02	25.83	20.76	30.62
	CK	12.36	7.07	7.53	2.66	25.48	20.64	24.27
	RS	37.86	10.76	10.31	4.67	17.00	6.19	13.20
	US	6.19	6.30	16.66	4.57	31.22	10.72	24.33

3 讨论

土壤团聚体是矿物质、有机质和生物物质相互作用的结果,是形成土壤良好结构的物质基础。本研究表明,采煤塌陷复垦区土壤各粒径团聚体含量总体表现为 $2\sim 1 > 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25 > 5\sim 3 > 7 > 7\sim 5 > 3\sim 2$ mm,其中以 $2\sim 1$ mm 粒级团聚体最高,占总量的 $25\%\sim 31\%$ 。而李辉信等^[16]通过干筛的方法发现红壤水稻土团聚体主要集中在 >3 mm 粒径,冷延慧等^[17]则发现长期施肥黑土团聚体以 $0.25\sim 1$ mm 粒径为主。说明不同土壤类型、肥力差异等对土壤团聚体分布具有很大的影响,原因可能与不同类型土壤团聚体形成的胶结物质种类和数量不同有关。本研究为复垦区土壤,与农田土壤相比土壤结构较差,微生物群落较少,肥力相对较低,但肥料的施用可以在一定程度上缓解块状结构体的形成,改变土壤团聚体的分布,提高 $2\sim 1$ mm 粒级团聚体含量,改善复垦区土壤结构。

本研究中复垦 4 年和复垦 8 年土壤团聚体含量无明显变化,但不同培肥措施下复垦土壤较未复垦生土明显降低了 >7 mm 和 $7\sim 5$ mm 团聚体含量,明显提高了 $2\sim 1, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25$ mm 团聚体含量,这

可能是相对于生土,复垦区土壤在长期耕作种植过程中,传统耕作和机械对土壤扰动程度大,同时作物根系及土壤动物活动加快了大粒径土壤团聚体向小粒径土壤团聚体的转变。邢旭明等^[18]依托 26 年长期定位试验研究表明,不同施肥处理改变了土壤团聚体的分布,其中单施有机肥和有机无机配施处理的 >0.25 mm 大团聚体比例显著高于不施肥处理,这是由于有机肥进入土壤后,增加了土壤有机胶结物质的含量,从而促使小粒径团聚体胶结形成大团聚体,所以在有机肥处理下大团聚体含量显著增加。而本研究中不同培肥处理之间团聚体含量并没有明显变化规律,分析其原因可能与施肥量和复垦年限有关,不同施肥量和复垦年限对土壤结构的影响程度不同,进而影响土壤团聚体含量。

本研究中土壤 MWD 和 GMD 总体表现为复垦 8 年 $>$ 复垦 4 年 $>$ 生土,土壤分形维数总体表现为复垦 8 年 $<$ 复垦 4 年 $<$ 生土,表明随复垦年限的增加,土壤团聚体稳定性增加。相同养分供应量条件下,以单施有机肥处理的 MWD 和 GMD 的值最高, D 值最小,以 CF 处理 MWD 和 GMD 的值最低, D 值最大。说明复垦土壤单施有机肥可以提高土壤的团聚程度,

土壤结构得以改善。而单施化肥,一定程度上会加快土壤微生物对土壤有机质矿化分解,减少有机胶结物质,同时单施化肥会引起土壤板结,破坏土壤团粒结构,不利于提高促进土壤团聚体稳定性。吕欣欣等^[19]也有类似的研究结果。本研究中,不同复垦年限下各施肥处理均表现为随土壤团聚体粒级减小有机碳含量逐渐增加的趋势,以0.5~0.25 mm粒级有机碳含量最高,这与李辉信等^[20]研究一致。原因是由于团聚体粒径越小,比表面积越大,吸附和保持有机碳能力越强;另一方面与小粒级团聚体中有机碳不易被微生物分解也有关系^[21]。同时刘中良等^[22]通过对连续20年长期培肥试验研究则发现,随土壤团聚体直径逐渐增大,其中的有机碳含量呈逐渐增加趋势。原因可能与土壤本身的性质有关,不同土壤中团聚体形成的胶结物质的种类和数量有很大差别,在有机质含量比较高的土壤中,大团聚体是较小粒级团聚体通过有机物质胶结形成,因此表现为有机碳含量随粒级增大而增加。

本试验表明不同培肥处理间以单施有机肥处理的各粒级团聚体有机碳含量最高,且复垦8年高于复垦4年,许多长期试验也都表明单施有机肥能提高土壤各粒径团聚体有机碳含量^[23-24]。原因可能是施用有机肥后作物产量的增加带入土壤中更多的新鲜残茬和根系分泌物,有机肥又为复垦土壤提供了大量的外源有机质,势必会造成土壤碳素含量增加^[25]。各培肥处理有机碳储量以2~1 mm粒级团聚体最高,3~2 mm粒级储量最低。这是由于本试验土壤中该级别的团聚体含量占绝对优势。可见,2~1 mm粒径团聚体是复垦土壤团聚体有机碳的贡献载体,提高该粒径团聚体含量可在一定程度上提高复垦土壤固碳能力。本研究土壤团聚体全氮含量及全氮储量与有机碳的变化趋势基本一致,这是因为土壤中95%氮素以有机态氮的形式存在于有机质中,而有机质中碳素的变化必然也会引起有机氮的变化。

4 结论

本试验条件下,采煤塌陷区复垦土壤团聚体含量总体随粒径的减小呈先增加后降低的趋势,其中以2~1 mm粒径土壤团聚体分布最多,3~2 mm粒径土壤团聚体含量最少。通过对复垦4,8年不同培肥处理的分析,增施有机肥可提高复垦土壤的MWD、GMD,降低分形维数,表明长期施肥尤其是单施有机肥可明显改善土壤结构,提高土壤的团聚稳定性。

复垦土壤团聚体有机碳、氮含量随粒径减小而递增,以0.5~0.25 mm粒径团聚体最高。有机碳氮储量则同土壤团聚体含量一致,以2~1 mm粒级团聚

体最高。单施有机肥可增加复垦土壤有机碳、氮含量,但不同施肥处理间有机碳氮储量无显著差异。

总体表明,采煤塌陷区复垦4,8年土壤团聚体分布特征及碳氮储量无明显变化,单施有机肥可提高复垦土壤团聚体有机碳氮含量及团聚体稳定性。

参考文献:

- [1] 李文军,杨基峰,彭保发,等. 施肥对洞庭湖平原水稻土壤团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014,47(20):4007-4015.
- [2] 何淑勤,郑子成. 不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J]. 水土保持通报, 2010,30(1):7-10.
- [3] 韩志卿,韩志才,张电学,等. 不同施肥制度下褐土微团聚体碳氮分布变化及其对肥力的影响[J]. 华北农学报, 2008,23(4):190-195.
- [4] Kundu N K, Ghose M K. Soil profile characteristic in Rajmahal Coalfield area[J]. Indian Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 25: 28-32.
- [5] 李君剑,严俊霞,李洪建. 矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4178-4185.
- [6] 刘京,常庆瑞,李岗,等. 连续不同施肥对土壤团聚体性影响的研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 24-26.
- [7] 王仁杰,强久次仁,薛彦飞,等. 长期有机无机肥配施改变了黄土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4678-4689.
- [8] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 671-678.
- [9] 孙天聪,李世清,邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841-1848.
- [10] 赵红,袁培民,吕贻忠,等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306-311.
- [11] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution[J]. Methods of Soil Analysis: Part 4, Physical Methods, 2002, 4: 317-328.
- [12] 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.
- [13] 姜灿烂,何园球,刘晓利,等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 716-722.
- [14] 易亚男,尹力初,张蕾,等. 施肥对不同地下水位水稻土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 144-153.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- 2016,37(5):1923-1930.
- [2] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999,63(5):1350-1358.
- [4] 龚仓,马玲玲,成杭新,等. 典型农耕区黑土和沼泽土团聚体颗粒中重金属的分布特征解析[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1635-1639.
- [5] Pinheiro E, Pereira M G, Anjos L. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red Latosol from Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*,2004,77(1):79-84.
- [6] 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.
- [7] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报,2014,25(3):671-678.
- [8] Giubergia J P, Martellotto E, Lavado R S. Complementary irrigation and direct drilling have little effect on soil organic carbon content in semiarid argentina[J]. *Soil and Tillage Research*,2013,134(8):147-152.
- [9] 董林林,于东升,张海东,等. 宁夏引黄灌区土壤有机碳密度时空变化特征[J]. 生态学杂志,2015,34(8):2245-2254.
- [10] 李霄云,王益权,孙慧敏,等. 有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响[J]. 土壤学报,2011,48(6):1125-1132.
- [11] 张耀方,赵世伟,李晓晓,等. 利用方式对灌淤土团聚体稳定性及有机碳官能团特征的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):169-174.
- [12] Mahmoud M, Janssen M, Peth S, et al. Long-term impact of irrigation with olive mill wastewater on aggregate properties in the top soil[J]. *Soil and Tillage Research*,2012,124(4):24-31.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学出版社,2000.
- [14] 陈丽珍. 亚表层培肥对土壤团聚体有机质特征的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2013.
- [15] 戴珏,胡君利,林先贵,等. 免耕对潮土不同粒级团聚体有机碳含量及微生物碳代谢活性的影响[J]. 土壤学报,2010,47(5):923-930.
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2000,32(14):2099-2103.
- [17] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报,2000,31(5):193-195.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*,2007,56(3):777-783.
- [19] 陈山. 不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [20] Sodhi G P, Beri 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(2):412-418.
- [21] 董林林,张海东,于东升,等. 引黄灌淤耕作对剖面土壤有机质组分构成的影响[J]. 土壤学报,2017,54(3):613-623.
- (上接第 189 页)
- [16] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3):422-427.
- [17] 冷延慧,汪景宽,李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(12):2171-2177.
- [18] 邢旭明,王红梅,安婷婷,等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):267-273.
- [19] 吕欣欣,丁雪丽,张彬,等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(1):1-10.
- [20] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3):422-429.
- [21] 刘敏英. 植茶年限对土壤团聚体组成及其有机碳组分影响[D]. 成都:四川农业大学,2012.
- [22] 刘中良,字万太,周桦,等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤,2011,43(5):720-728.
- [23] 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报,2010,47(5):931-938.
- [24] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(5):950-960.
- [25] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1473-1480.