文章编号:1672 - 3317(2019)07 - 0045 - 07

施肥对采煤塌陷复垦土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响

梁利宝，冯鹏艳，许剑敏
（山西农业大学 资源环境学院，山西 太谷 030801）

摘 要:【目的】研究施肥对采煤塌陷复垦土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响，为改善采煤塌陷复垦土壤的物理团粒结构与化学性质，促进复垦土壤碳氮循环与利用提供一定理论基础。【方法】以山西省晋城市采煤塌陷复垦区土壤为研究对象，在常规灌溉条件下，以不施肥处理为对照(CK)，研究了有机肥、无机肥、有机无机肥配施3种施肥处理对0~20、20~40 cm土层团聚体组成及碳、氮分布的影响。【结果】与CK相比，有机肥处理显著增加了土壤＞2 mm和1~2 mm粒级团聚体量，降低了0.053~0.25 mm和＜0.053 mm粒级微团聚体量，单施化肥较有机肥处理提高了微团聚体量。单施有机肥、有机无机肥配施处理土壤的平均质量直径(*MWD*)、几何平均直径(*GMD*)显著高于单施化肥处理，分形维数(*D*)低于化肥处理。有机肥处理土壤有机碳、全氮量最高，有机无机肥处理配施次之，单施化肥处理显著低于有机肥处理；土壤有机碳、全氮主要分布在＞2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm粒级大团聚体，显著高于0.053~0.25 mm、＜0.053 mm粒级小团聚体；有机肥处理、有机无机肥配施处理土壤＞2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm粒级团聚体中的有机碳、全氮量要显著高于单施无机肥处理的。各施肥处理土壤1~2 mm、0.25~1 mm粒级团聚体有机碳、全氮贡献率较高，显著高于其余粒级。有机肥、有机无机配施处理各级团聚体(除0.053~0.25 mm外)的C/N值显著高于CK，而单施化肥处理与CK差异不显著。【结论】不同施肥处理(尤其是有机肥)提高了复垦土壤大团聚体量，增强了团聚体稳定性，提高了团聚体有机碳、全氮量。

关 键 词:采煤塌陷；复垦土壤；施肥；团聚体；有机碳；全氮；常规灌溉
中图分类号:S144.1 **文献标志码**:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180656

梁利宝，冯鹏艳，许剑敏. 施肥对采煤塌陷复垦土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. **灌溉排水学报**，2019，38(7):45-51.

0 引 言

采煤塌陷是在煤矿开采过程中，因采空区顶板岩层在超出其极限单向抗压强度时而发生断裂，其上部覆岩产生冒落、坍塌，延伸到地面的土地形成塌陷坑和塌陷洼地，导致农田大量破坏。目前我国采煤区地面塌陷造成土地破坏总量超过400万hm^2，并且仍以3.3万~4.7万hm^2/a的速度增加[1]，采煤塌陷地的生态恢复成为矿区复垦的研究热点之一。采煤塌陷复垦土壤作为井工开采方式破坏耕地后而进行重构的一种土壤类型，其层次、结构均已发生了明显变化，由于重构土壤就近取自于采煤塌陷区周边黄土质生土，土壤团聚体结构较差、生物活性低，尤其有机质(碳)和养分偏低是制约复垦土壤生产力恢复的主要原因。我国农村人多地少的矛盾十分突出，尽快恢复采煤塌陷复垦土壤的生产力、提高粮食产量就显得尤为迫切。近年来，关于采煤塌陷复垦土壤快速培肥、熟化方面研究主要集中在复垦土壤氮、磷、钾三大营养要素的提高以及粮食产量的增加[2-4]，而关于施肥对采煤塌陷复垦土壤团聚体组成及其碳、氮分布的研究较少。

团聚体是土壤物理结构的主要表现形式之一，土壤有机碳不仅是营养供应的核心物质，还可以增强土粒的团聚性，促进团粒结构形成[5]。已有研究[6-10]表明：2~5 mm和0.5~2 mm粒径团聚体是红壤水稻土有机碳、全氮和潜在矿化氮的主要载体；紫色土碳氮则主要分布在大于0.25 mm粒级大团聚体中；棕壤团聚体氮主要分配在0.25~1 mm优势粒级的团聚体，且有机肥和有机无机配施增加了大团聚体数量和稳定性；在塿土

收稿日期:2018-12-06
基金项目:山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放基金项目(2016004)
作者简介:梁利宝(1976-)，男，山西晋中人。副教授，博士，主要从事土壤养分循环利用方面研究。E-mail: lianglibao234@163.com

上，<0.25 mm团聚体中有机碳和全氮的量最高，1~2 mm团聚体量最低，长期氮磷钾配合有机肥能显著增加土壤0.25~1 mm团聚体对土壤有机碳和全氮的固存比例。红壤上，化肥与有机肥配施显著提高了大团聚体（>2 mm）和较大团聚体（0.25~2 mm）量，而降低了黏粉粒（<0.053 mm）量。可见不同土壤类型团聚体的碳、氮分布规律也是不一样的，复垦土壤本质上属于石灰性褐土，由于采用了混推模式进行复垦，物理、化学、生物性质均较差，土壤的原始结构、层次显著被改变，因此有别于自然农田土壤。基于此，研究有机肥、无机肥常规施肥模式针对重建复垦土壤团聚体粒级组成及其碳氮分布的影响，以期为采煤塌陷复垦土壤碳、氮循环和利用提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点选在山西省晋城市北石店镇采煤塌陷复垦区（N35°32′38.0″，E112°52′46.3″），该地区属暖温带半温润大陆性季风气候，年平均气温5~10 ℃，年平均降水量550~650 mm。采煤塌陷区采用生土熟土混推模式进行工程复垦，因此重建土壤存在养分低且分布不均匀，土壤物理结构差等特点，土壤厚度约为50~80 cm。试验时间为2015年5月—2017年10月。供试土壤类型为石灰性褐土，土壤有机质量为7.35 g/kg，全氮量为0.60 g/kg，全磷量为0.59 g/kg，pH值为8.06；土壤体积质量为1.50 g/cm^3。土壤不同团粒结构体：>2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm 的百分比分别依次为14.0%、38.5%、8.0%、21.8%、15.8%。在常规灌溉条件下，根据当年降雨情况及土壤墒情，分别在2015年7月20日、2016年7月25日、2017年8月9日进行灌溉，灌水量依次为650、900、750 m^3/hm^2。本试验共设置4个处理，分别为不施肥（CK）、有机肥（M）、无机肥（NPK）、有机肥无机肥配施（NPKM），每个小区面积是5 m×4 m=20 m^2，每个处理重复3次，采用完全随机区组设计。供试化肥施用尿素（N 46%）和过磷酸钙（P_2O_5 12%）、硫酸钾（K_2O 43%）；有机肥使用鸡粪，含N量为1.24%，含P_2O_5量为0.93%，含K_2O量为1.02%。各施肥处理中施入等量养分（氮、磷和钾），即施N 120 kg/hm^2，P_2O_5 90 kg/hm^2，K_2O 98 kg/hm^2。所有肥料均在播种前一次性撒施入土壤。供试作物为玉米（泽玉41）。

1.2 采样方法与测定指标

2017年玉米收获后，按照对角线取样法多点取样且避开植物根系，用环刀分别在土壤0~20 cm和20~40 cm深度采集原状土，在室内沿着原状土自然裂隙掰成小土块，并挑出砾石、侵入体及植物残根等，自然风干。将风干土样置于孔径依次为2、1、0.5、0.25、0.053 mm的套筛，以30次/min速度手工振荡5 min，制备成不同粒级（>2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm）的土壤团聚体分别称质量，计算各级别机械稳定性团聚体的量。采用环刀测定[11]土壤体积质量，采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法[12]测定土壤总有机碳，采用凯氏消煮法[12]测定土壤全氮。样品分析于2017年10月在山西农业大学资源环境学院进行。

1.3 数据处理及分析

土壤团聚体平均质量直径[13]（*MWD*）、几何平均直径[14]（*GMD*）表示团聚体稳定性，分形维数[15]（*D*）表示团聚体结构性和分形特征，计算式分别为：

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} X_i W_i \,, \tag{1}$$

$$GMD = \mathrm{e}^{[\sum_{i=1}^{n}(\ln X_i W_i)]} \,, \tag{2}$$

$$\frac{W(\delta - d_i)}{W_o} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \,, \tag{3}$$

式中：W_i为第i级团聚体质量百分数（%）；X_i为第i个筛子上团聚体直径（mm）；W_i为第i个筛子上团聚体质量百分比（%）。d_i为某级团聚体平均直径（mm）；$W(\delta\text{-}d_i)$表示粒径小于d_i的团聚体质量；W_o为团聚体总质量；$d_{\max}$为团聚体的最大粒径（mm）。

团聚体的贡献率（%）= [该粒级团聚体养分（g/kg）×该粒级团聚体占比（%）/土壤养分（g/kg）] ×100

数据处理采用Excel 2016进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 施肥对复垦土壤团聚体组成的影响

表1为不同土层土壤团聚体组成。从表1可以看出，经过3 a培肥，各施肥处理不同程度地改变了复垦土壤团聚体的组成。0~20 cm土壤不同粒级团聚体量差异显著，1~2 mm团聚体最多，达到了团聚体总量的43.7%~47.5%，且与CK差异显著；0.053~0.25 mm次之，0.25~1 mm则是最少，仅达到了团聚体总量的8.0%~10.8%。与CK相比，除了0.053~0.25 mm、<0.053 mm团聚体量下降之外，其余处理的各级团聚体量均显著增加。说明有机无机肥配施能显著提高大团聚体(>2 mm，1~2 mm)的量，降低了<0.053 mm团聚体量。有机肥处理显著增加了>2 mm团聚体量，还增加了1~2 mm团聚体量，显著降低了0.053~0.25 mm团聚体量；NPK处理的0.053~0.25 mm和<0.053 mm团聚体量降幅低于M处理的。

表1 不同土层土壤团聚体组成 %

土层深度/cm	处理	>2 mm	1～2 mm	0.25～1mm	0.053～0.25 mm	<0.053 mm
0~20	CK	13.5b	39.2c	8.5b	23.6a	15.2a
	NPK	14.4b	43.7b	8.0b	21.1a	12.8b
	M	18.8a	47.5a	8.4b	15.5b	9.8c
	NPKM	19.5a	46.8a	10.8a	13.9c	9.0c
20~40	CK	12.0c	36.6d	8.4b	25.7a	17.3a
	NPK	13.4c	42.6c	8.2b	22.4b	13.4b
	M	17.0a	46.1b	7.9b	20.5b	8.5c
	NPKM	15.3b	50.2a	9.3a	15.4c	9.8c

注 同列数据不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)，下同。

与0~20 cm土层相比，20~40 cm土层中各施肥处理的大团聚体(>2 mm、1~2 mm)均有不同程度的下降，微团聚体0.053~0.25 mm、<0.053 mm数量略有上升，且处理间差异较为明显。与CK相比，不同施肥处理显著降低了0.053~0.25 mm、<0.053 mm团聚体量，M处理显著增加了>2 mm、1~2 mm团聚体量。主要是因为随着土壤深度增加，土壤中胶结物质减少，大团聚体量降低，小团聚体(0.053~0.25 mm)数量相对上升。说明施肥对改变有机碳在不同级别团聚体中的分布有明显影响。

2.2 施肥对复垦土壤团聚体稳定性的影响

表2为不同土层土壤团聚体稳定性。从表2可以看出，0~20 cm土层，不同施肥处理的土壤平均质量直径*MWD*和几何平均直径*GMD*均显著高于CK，增幅分别是11.7%~23.4%、15.8%~35.5%，其中单施有机肥处理最高，说明施肥增加了各级团聚体中有机碳量，因此增强了土壤颗粒的团聚化作用。不同施肥处理的分形维数*D*均低于CK，未达到差异显著水平。施肥处理20~40 cm土层*MWD*略低于0~20 cm土层的；20~40 cm土层单施化肥的*MWD*与CK差异不显著，M处理仍然为最大；各施肥处理的团聚体分形维数*D*的差异仍不显著，CK处理仍是最高的，与其余处理差异不显著。

表2 不同土层土壤团聚体稳定性

土层深度/cm	处理	*MWD*/mm	*GMD*/mm	*D*
0~20	CK	1.54c	1.07b	2.84a
	NPK	1.72b	1.24b	2.78ab
	M	1.90a	1.45a	2.80a
	NPKM	1.88a	1.40a	2.73ab
20~40	CK	1.40b	1.13c	2.68a
	NPK	1.44b	1.25b	2.60a
	M	1.65a	1.47a	2.48ab
	NPKM	1.59a	1.37ab	2.52ab

2.3 施肥对复垦土壤团聚体有机碳量(SOC)、全氮量组分的影响

表3为不同土层土壤团聚体有机碳量、全氮量。从表3可以得出，在0~20 cm土层，>2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm粒级团聚体SOC量较高，0.053~0.25 mm、<0.053 mm粒级团聚体中有机碳量较低，这说明有机碳大多存储在较大团聚体中；M处理各粒级团聚体、NPKM处理>2 mm、1~2 mm团聚体SOC量均显著高于NPK处理；各处理与CK的差异性体现在>2 mm、1~2 mm、0. 25~1 mm团聚体，而0.053～0.25 mm、<0.053 mm团聚体的SOC与CK差异不显著。土壤团聚体全氮的变化趋势与有机碳较为类似，不同之处是各施肥处理间的差异不显著。

20~40 cm土层，各处理团聚体有机碳量(SOC)变化趋势与0~20 cm土层类似，但>2 mm与1~2 mm、0.25~1 mm、0.25~1 mm粒级仍然是SOC的主要载体，虽然不同粒径团聚体全氮量差异性不显著，但是全氮仍然主要集中在>2 mm与1~2 mm粒级。总体上土壤不同粒级团聚体SOC、全氮量表现出：M处理量最高，NPKM处理次之，NPK处理仅高于CK处理。随着土层深度加深，SOC、全氮量减少，其原因在于肥料、植

物的枯枝落叶主要聚集在表层 0～20 cm土壤中进行养分转化和积累。

表 3 不同土层土壤团聚体有机碳量、全氮量 g/kg

指标	粒径	0～20 cm				20～40 cm			
		NPK	M	NPKM	CK	NPK	M	NPKM	CK
有机碳量/(g·kg^{-1})	＞2 mm	4.56abC	6.67bA	5.28bB	4.40aC	3.83bC	4.80bA	4.02c B	3.35abD
	1~2 mm	4.25bC	5.52cB	6.22aA	3.52bD	4.43aB	4.72bB	5.13aA	3.08bC
	0.25~1 mm	4.91aC	7.53aA	5.04bB	4.28aC	3.62bcC	5.07aA	4.67bB	3.76aC
	0.053~0.25 mm	3.79cB	4.03dA	3.93cAB	3.54bB	3.42cAB	3.75cA	3.25dB	3.19cB
	＜0.053 mm	3.74cB	4.10dA	3.84cAB	3.57bB	3.14dB	3.89cA	3.52dAB	3.20cB
全氮量/(g·kg^{-1})	＞2 mm	0.53aA	0.52abA	0.52abA	0.47aB	0.43aA	0.44aA	0.40bA	0.32bB
	1~2 mm	0.53aA	0.55aA	0.53aA	0.48aB	0.41bB	0.43abAB	0.47aA	0.34aC
	0.25~1 mm	0.52aA	0.54aA	0.53aA	0.48aB	0.44aA	0.40bB	0.44abA	0.35aC
	0.053~0.25 mm	0.48abB	0.51bA	0.50abAB	0.44bC	0.40aB	0.45aA	0.43bAB	0.30bC
	＜0.053 mm	0.49abA	0.50bA	0.50abA	0.44bB	0.38abB	0.40bB	0.45abA	0.35aC

注　同列数值后不同小写字母表示不同粒级间差异达0.05显著水平，同行数值后不同大写字母表示不同处理间差异达0.05显著水平。下同。

2.4 土壤各级团聚体对有机碳量、全氮量的贡献率

表4为不同土层土壤各级团聚体对有机碳量、全氮量的贡献率。从表4可以得出，在0~20 cm土层，土壤有机碳量、全氮量贡献率较大的团聚体粒级主要集中在0.25~1 mm和1~2 mm，其次为0.053~0.25 mm团聚体，而>2 mm和<0.053 mm团聚体有机碳的贡献率较小，虽然＞2 mm团聚体有机碳量、全氮量高于0.053~0.25 mm团聚体（见表3），但是由于＞2 mm团聚体量其所占比例较低（表1），因此贡献率不高。＞2 mm、< 0.053 mm粒级团聚体，不同施肥处理间SOC量差异显著，全氮量差异则不显著；对于同一粒级的SOC和全氮量贡献率而言，M处理2 mm、0.25~1 mm，NPK处理1~2 mm，NPKM处理的0.053~0.25 mm，分别与其余处理差异显著。同一处理的不同粒级团聚体SOC贡献率差异显著，而全氮量差异不显著。

表 4 不同土层土壤各级团聚体对有机碳量、全氮量的贡献率 %

指标	粒径	0～20 cm				20～40 cm			
		NPK	M	NPKM	CK	NPK	M	NPKM	CK
有机碳量/(g·kg^{-1})	＞2 mm	12.7bE	15.6aD	9.5cE	6.0dE	11.7bD	14.9aC	11.6cD	10.5dE
	1~2 mm	33.5aA	26.3cB	30.8bA	28.4cA	31.5aA	27.5bA	28.3bA	25.7cA
	0.25~1 mm	20.5cB	30.6aA	27.8bB	25.4bB	24.5bB	27.6aA	22.8cC	20.3dC
	0.053~0.25 mm	18.6bC	18.0bC	20.9aC	21.6aC	16.7dC	19.3cB	24.9aB	22.8bB
	＜0.053 mm	14.7bD	9.5dE	11.0cD	18.6aD	15.6bC	12.5cD	13.5cD	17.8aD
全氮量/(g·kg^{-1})	＞2 mm	17.2cB	17.4cC	23.4aB	20.4bB	15.8dB	19.5aB	18.8abC	19.3aC
	1~2 mm	27.0bA	32.4aA	25.3cA	24.7cA	26.5aA	27.5aA	24.8bB	25.3abA
	0.25~1 mm	28.3aA	24.8bB	26.2abA	25.3bA	27.6aA	26.7aA	28.4aA	22.6bB
	0.053~0.25 mm	13.3aC	11.8bE	11.9bD	12.8abD	14.6abB	12.9bC	13.4bD	15.1aD
	＜0.053 mm	14.2bC	13.6bD	13.2bC	16.8aC	15.5bB	13.4cC	14.6bcD	17.7aC

20~40 cm土层，土壤SOC、全氮量贡献率较大的团聚体粒级仍是主要集中在0.25~1 mm和1~2 mm，这与0~20 cm土层相似。不同的是，对于同一施肥处理而言，不同粒级团聚体贡献率发生了变化。总的来说，粒径最大和最小的团聚体SOC和全氮量的贡献率较小。

表 5 施肥处理复垦土壤团聚体的碳氮比值

土层深度/cm	处理	＞2 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	0.053~0.25 mm	＜0.053 mm
0~20	NPK	8.60d	8.02c	9.44b	7.70b	7.63b
	M	12.83a	10.04b	13.94a	7.89ab	8.20a
	NPKM	10.15b	11.74a	9.50b	7.85ab	7.67b
	CK	9.36c	7.32d	8.91c	8.05a	8.10a
20~40	NPK	8.90c	10.79a	8.22c	8.55b	8.26c
	M	10.90a	10.97a	12.68a	8.32b	9.71a
	NPKM	10.04b	10.90a	10.60b	7.56c	7.82d
	CK	10.47ab	9.04b	10.73b	10.63a	9.04b

2.5 不同施肥处理土壤团聚体的碳氮比值(C/N)

表5为施肥处理复垦土壤团聚体的碳氮比。从表5可以得出，0~20 cm土层中，不同施肥处理的0.053~0.25 mm、< 0.053 mm团聚体C/N值显著低于CK，M、NPKM处理＞0.25 mm的团聚体的C/N值显著高于CK。M处理＞2 mm、1~2 mm、< 0.053 mm的C/N值显著高于其余处理，其余粒径高于NPK处理，因此总体效果较好，NPKM处理效果次之，显然有机肥的施入明显提高了土壤有机碳，随着土有机碳的提高

以及外源养分的施入增加了土壤微生物活性，加快了有机质的分解，土壤中氮素累积大于有机碳的累积。在不同粒级团聚体，差异性也不尽相同。20~40 cm土层，施肥处理1~2 mm的C/N值显著高于CK处理，其余粒径同一粒级团聚体的差异性不显著，不同处理间差异较小。CK只有0.053~0.25 mm粒级团聚体C/N值显著高于其余处理。

3 讨 论

3.1 施肥对复垦土壤团聚体组成及稳定性的影响

有机肥的投入主要增加了土壤大团聚体（＞2 mm、1~2 mm）的量，极大地促进了团聚作用。有研究表明，土壤的全氮量和有机碳量的消长趋势较为一致[16]，本试验也得到了类似的结果。有机肥施入土壤后明显增加有机碳量，同时微生物量增加，加速了有机碳的分解，尤其是没有物理保护的较小粒级的团聚体有机碳的分解，导致有机肥处理土壤0.053~0.25 mm、＜0.053 mm团聚体有机碳量低于其他粒径（表3），这与刘中良等[17]研究结果较为类似。单施化肥增加的土壤大团聚体数量要明显低于其余处理，因为水溶性碳的释放以及经微生物作用分解的水解碳水化合物等胶结剂的严重缺乏，导致了土壤团聚体的降低。此外，化学磷肥的施入会显著提高土壤团聚体有机碳的矿化，致使有机碳量降低[18]。

有机肥处理下大粒级团聚体中氮增加幅度最大，这可能是因为有机肥进入土壤经破碎、分解后，先与土壤大粒级团聚体结合。冷延慧等[19]在黑土上的研究表明，有机肥与无机肥配施处理土壤大团聚体的数量显著减少，微团聚体的数量显著增加，原因可能是有机肥中含有大量凝聚性较差的分散性钠、钾离子，促进了土粒的分散和大团聚体破散。

*MWD*和*GMD*常被作为反映土壤团聚体状况的指标，其值越大表示土壤的团聚度越高，团聚体稳定性越强，团粒结构粒径分布的分形维数*D*越小，则土壤结构与稳定性越好，抗蚀能力越强[20]。本研究表明，有机肥处理的*MWD*和*GMD*显著高于单施化肥处理，是因为有机肥提高了胶结物质量，提升其对小粒级团聚体的胶结能力。施肥后团聚体的*D*均较CK有所降低，团聚体结构得以改善，这与何冰等[21]的研究结论一致。0~20 cm与20~40 cm土层的*MWD*和*GMD*、*D*差异不明显，说明了长期单施化肥土壤团聚体结构性、稳定性变差，而有机肥有利于保持良好的土壤结构。团聚体中有机碳量均表现出随团聚体粒径减小而降低的趋势，大粒级团聚体由小粒径土粒经有机物质的胶结作用而形成，因而能吸存更多的碳素。

张艺等[22]研究发现稻田土壤有机肥处理下粗大团聚体（>2 mm）所占比例最高，达到45.88%~53.57%；邢旭明等[8]研究表明棕壤上施用无机肥减少了大团聚体量。而本试验中在复垦土壤上施用有机肥或者是无机肥1~2 mm团聚体比例均为最大，原因可能是复垦土壤属于重建土壤，生土和熟土混存在一起导致的。

3.2 施肥对复垦土壤有机碳、氮量的影响

单施化肥提高土壤有机碳效果较差，是因为化肥不能给土壤输入外来有机物料（碳），只能通过根茬残留和微生物分泌物增加土壤有机物，另外一个原因则是因为单施化肥不能满足微生物生长繁殖对碳源和营养元素的需求，降低了C/N，微生物处于“饥饿”或“半饥饿”状态，反而刺激了微生物消耗土壤固有的那部分有机碳，致使土壤有机碳库处于“亏损”状态，这与高继伟等[23]在采煤塌陷复垦土壤上的研究结果是一致的。然而张亚杰等[24]的研究则认为单施化肥可以增加土壤有机碳量，可能是因为在质地黏重的土壤中厌氧微生物是优势微生物，分解有机质的速度缓慢且不彻底，导致土壤中有机碳的积累。李廷亮等[25]发现单施化肥明显降低了黄土旱塬有机碳的总量，不施肥处理则较化肥处理提高了土壤有机碳总量，提高了有机碳的固存。

有机肥作为有机碳的前身，不仅能补充土壤有机碳还可改善土壤物理结构，其归还碳量远大于土壤矿化损失碳量。有机肥的胶结作用可以促进土壤团聚体结构的发育，尤其是土壤大团聚体内的微团聚体形成，有机碳受到团聚体的包裹作用有效地避免了被微生物分解，从而使有机碳得到积累[26]。存在于有机肥中的大量微生物能够快速分解植物残体等有机物质，从而使有机碳组分提高。此外，腐熟鸡粪自身就带有大量微生物，微生物碳是有机碳的重要组分，因此单施有机肥有机碳显著高于其余处理。

有机肥无机肥配施可以分别满足微生物生长所需的碳源和氮源，从而促进了微生物对有机肥的分解，较单施有机肥更能有效降低C/N值，明显地提高了微生物活性，加速了有机碳的矿化速度，因此比单施有机肥处理的有机碳量要低。王润莲等[27]研究表明化肥氮提高了土壤硝化过程中氮量，促进其N_2O的排放，因此降低了土壤氮量。CK由于常年不施肥玉米产量偏低、根系生物量较小，根茬残留物返还土壤较少，因此该处理土壤有机碳量逐年下降。除根茬外，根系分泌物也是CK土壤有机碳主要输入方式之一，但是由于根系

分泌物的激发作用引起的土壤自身有机碳损失量更大，即“入不敷出”，最终导致该处理有机碳的降低。

3.3 土壤碳氮比对团聚体稳定性影响

土壤团聚体是土壤中化学反应场所和微生物生存的载体，土壤团聚体内碳、氮的吸收和矿化影响着土壤团聚体的形成和转化，因此团聚体碳氮比失衡可能导致团聚体稳定性的降低。C/N值越高表明有机物的分解程度越低，有机碳趋于积累，C/N值低抑制有机质的腐殖质化，并促进土壤的硝化作用，因此微生物活性越强，土壤团聚体稳定性越强。各处理C/N值也未表现出随粒级的增大而升高的趋势，可能因为新鲜的有机物质和半分解有机物大部分存在于大团聚体中，这也与刘中良等[17]研究结果较为吻合。本试验结果表明，除了CK土壤粒径0.053~0.25 mm的团聚体C/N显著高于其余处理外，其余粒径C/N均小于施肥处理，这与谢钧宇等[9]研究结果有区别，这可能与土壤类型、施肥量有关系。也有研究表明单施化肥尤其是氮肥降低了C/N比，加速土壤有机碳分解，微生物生长受到影响，降低了微生物碳[28]，这与本试验的研究结果较为吻合。虽然单施有机肥处理的土壤的C/N明显高于其余处理，然而该处理的氮元素量较低，可能限制了微生物的生长。

4 结 论

1）不同施肥处理均增加了土壤大团聚体量、降低了微团聚体量，有机肥、有机无机配施处理效果较为显著，单施化肥处理效果一般，单施化肥、有机无机配施处理对团聚体组成的影响在0~20 cm土壤效果强于20~40 cm。有机肥、有机无机配施处理的平均质量直径（*MWD*）、几何平均直径（*GMD*）显著高于单施化肥处理，分形维数（*D*）较低，说明团聚体稳定性最高。

2）复垦土壤不同施肥处理的有机碳量、全氮量分布情况较为一致，主要分布在＞2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm粒径。有机肥处理不同粒径养分均显著高于化肥处理。

3）土壤有机碳、全氮贡献率较大的团聚体粒级主要集中在0.25~1 mm和1~2 mm。单施化肥、有机无机配施处理团聚体（0.25~1 mm除外）的C/N值显著低于CK。

参考文献：

[1] 梁利宝，洪坚平，谢英荷，等. 不同培肥处理对采煤塌陷地复垦不同年限土壤熟化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):140-144.

[2] 梁利宝，闫峰，许剑敏. 不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 262-266.

[3] 武欣，孟会生，李廷亮，等. 不同肥料配施对复垦土壤团聚体及有效磷含量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 104-109，120.

[4] 党雯. 解钾菌的筛选及其对矿区复垦土壤肥力的影响[D]. 太原：山西大学，2015.

[5] 刘春红，苏筱雨. 稻菜轮作下不同施肥处理对土壤团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报，2013, 32(2):97-99.

[6] 向艳文，郑圣先，廖育林，等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. 中国农业科学，2009，42(7):2 415-2 424.

[7] 曹良元，张磊，蒋先军，等. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中几种氮素形态分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009, 15(4):824-830.

[8] 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.

[9] 谢钧宇，杨文静，强久次仁，等. 长期不同施肥下塿土有机碳和全氮在团聚体中的分布[J]. 植物营养与肥料学报，2015, 21(6):1 413-1 422.

[10] 邸佳颖，刘小粉，杜章留，等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报，2014, 22(10):1 129-1 138.

[11] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 第2版. 北京：中国林业大学出版社，2004:20-25.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京：中国农业出版社，2013: 40-84.

[13] VAN Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J].Soil Science Society of America Journal,1950,14(C): 20-23.

[14] LI Yayun, LIU Lei, AN Shaoshan, et al. Research on the Effect of Vegetation and Slope Aspect on the Stability and Erodibility of Soil Aggregate in Loess Hilly Region Based on Le Bissonnais Method[J]. Journal of Natural Resources, 2016, (31):287-298.

[15] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993(20):1 896-1 899.

[16] 刘晓利，何园球，李成亮，等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报，2009, 46(2):255-262.

[17] 刘中良，宇万太，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.

[18] 陈晓芬，刘明，江春玉，等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征[J]. 中国农业科学，2018，51(17):3 325-3 334.

[19] 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):2 171-2 177.

[20] 周刚，赵辉，陈国玉，等. 花岗岩红壤区不同地类土壤抗蚀性分异规律研究[J]. 中国水土保持, 2008(9): 27-29，45.

[21] 何冰，李廷亮，栗丽，等. 采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J]. 水土保持学报，2018, 32(4):184-189，196.

[22] 张艺，戴齐，廖超林，等. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响[J]. 中国土壤与肥料，2017（1）：28-32.

[23] 高继伟，谢英荷，李廷亮，等. 不同培肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报，2018, 37(5):6-12.

[24] 张亚杰，钱慧慧，刘坤平，等. 施肥对玉米/大豆套作土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 华南农业大学学报，2016, 37(3):29-36.

[25] 李廷亮，李顺，谢英荷，等. 不同施肥措施对晋南旱塬麦田土壤碳氮变化的影响[J]. 灌溉排水学报，2018, 37(11):43-49.
[26] 段建南. 黄土高原土壤变化及其过程模拟[M]. 北京：中国农业大学出版社，2001:103-110.
[27] 王润莲，张志栋，刘景辉，等. 施肥对免耕旱作燕麦田土壤温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报，2016, 35(12):55-59.
[28] FEIKE Dijkstra, SARAH Hobbie, PETER Reich, et al. Divergent effects of elevated CO_2, N fertilization, and plant diversity on soil C and N dynamics in a grassland field experiment[J]. Plant Soil, 2005, 272(1/2): 41-52.

Efficacy of Fertilization in Improving Soil Aggregation, Carbon and Nitrogen in Soil Reclaimed from Subsided Areas Caused by Coal Mining

LIANG Libao, FENG Pengyan, XU Jianmin
（College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China）

Abstract:【Objective】The objective of this paper is to present experimental results on efficacy of fertilization in improving aggregation and carbon and nitrogen accumulation in soil reclaimed from subsided areas caused by coal mining.【Method】The experiment was conducted under conventional irrigation with non-fertilization as the CK. We compared three treatments: applying organic fertilizer, inorganic fertilizer, and mixture of organic and inorganic fertilizer. For each treatment, we measured the size of soil aggregates, and carbon and nitrogen content in 0~20 cm and 20~40 cm soil in a coal mining-induced subsided area at Jincheng City in Shanxi Province.【Result】Compared to CK, organic fertilizer significantly increased the content of macro-aggregates sized >1 mm, and reduced the content of micro-aggregates sized < 0.25 mm. Inorganic fertilization enhanced formation of micro-aggregates, compared to organic fertilization. Applying organic fertilizer significantly increased the average weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the aggregates, and reduced the fractal dimension D of the aggregates. The content of organic carbon and total nitrogen in soil under organic fertilization was the highest, followed by organic-inorganic fertilization. The content of carbon and total nitrogen in soil with a single application of inorganic fertilizer was much lower than that under organic fertilization. Majority of organic carbon and total nitrogen were found in aggregates > 0.2 mm, 1～2 mm and 0.25～1 mm, especially under organic and organic-inorganic fertilization. The C∶N ratio in all aggregates (except those in 0.053～0.25 mm) was much lower under organic and organic-inorganic fertilization than under CK, and C∶N ratio in CK and inorganic fertilization was comparable.【Conclusion】Fertilizations, especially organic fertilizer, can enhance macro-aggregation in reclaimed soil from subsided areas induced by coal mining. It also increased the content of organic carbon and total nitrogen in the aggregates.

Key words: coal mining-induced subsidence; reclaimed soil; fertilization; aggregates; organic carbon; total nitrogen; conventional irrigation

责任编辑：陆红飞