

# 施肥措施对复垦土壤团聚体碳氮含量和作物产量的影响

曹寒冰<sup>1</sup>, 谢钧宇<sup>1,2</sup>, 强久次仁<sup>3</sup>, 郭璐<sup>4</sup>, 洪坚平<sup>1</sup>, 荆耀栋<sup>1</sup>, 孟会生<sup>1\*</sup>

(1. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801; 2. 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 太原 030031;

3. 西藏山南地区错那县农牧局, 山南 856700; 4. 山东省滨州畜牧兽医研究院, 滨州 256600)

**摘要:** 研究复垦后不同施肥措施下有机碳(OC)和全氮(TN)在水稳性团聚体及粉黏粒组分中的分布特征, 以期深入理解不同施肥措施下土壤有机碳的固持机制。以生土和连续6年不同施肥措施的复垦土壤为研究对象, 采集0~20 cm耕层土壤样品, 利用湿筛法进行土壤粒径分组, 分析大粒径大团聚体(>2 mm)、小粒径大团聚体(>0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)中OC和TN含量, 判断各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳储量的驱动因素, 探究团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量与作物产量之间的关系。试验设不施肥(CK)、施氮磷钾化肥(NPK)、单施有机肥(M)和有机无机肥配施(MNPK)4个处理。结果表明: 1) 整个试验周期(2008—2013年), 同CK相比, NPK、M以及MNPK处理均显著提高了玉米籽粒产量, 且以MNPK处理的效果最显著, 分别提高了79.49%、116.07%和113.85%。2) 大团聚体和微团聚体中OC和TN含量相近, 总体高于粉黏粒组分。同生土相比, CK、NPK和M处理均显著提高了>0.25~2、0.053~0.25 mm团聚体和<0.053 mm组分中OC含量。MNPK处理显著提高了各粒径团聚体和<0.053 mm组分中OC含量。此外, CK、NPK、M和MNPK处理均显著提高了各粒径团聚体中TN含量; 大团聚体和微团聚体中有机碳和全氮富集系数相近, 总体高于粉黏粒组分。M以及MNPK处理均显著提高了各粒径团聚体及粉黏粒组分(除>2 mm团聚体外)的C/N比。3) 土壤有机碳储量受>2 mm团聚体的百分比数量驱动, 其余各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量对土壤有机碳储量的贡献较大。4) 作物产量随着各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的增加呈线性增加, 说明该区域土壤有机碳库仍未达到饱和, 且以0.053~0.25 mm团聚体中有机碳含量与作物产量关系最紧密。因此, 在采煤塌陷区的低肥力复垦土壤上采取有机无机肥配施, 对土壤质量及农业生态持续性具有积极的作用。

**关键词:** 复垦; 土壤; 水稳性团聚体; 有机碳; 全氮; 作物产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.017

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-18-0135-09

曹寒冰, 谢钧宇, 强久次仁, 等. 施肥措施对复垦土壤团聚体碳氮含量和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 135-143. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.017 <http://www.tcsae.org>

Cao Hanbing, Xie Junyu, Qiang Jiu Ciren, et al. Effects of fertilization regimes on carbon and nitrogen contents of aggregates and maize yield in reclaimed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 135-143. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.017 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

团聚体作为土壤的重要组成部分, 直接参与土壤的物理、化学和生物过程, 其数量和质量对于维持土壤肥力、改良土壤质量和调节生态功能等方面发挥着积极作用<sup>[1-2]</sup>。有机碳作为土壤质量的核心, 是评价土壤肥力的一个关键指标, 与团聚体相互作用紧密, 有机碳与矿物颗粒胶结形成稳定的团聚体<sup>[3-4]</sup>, 同时, 团聚体的物理保护机制将“禁锢”在其中的有机碳与微生物之间的空间“隔离”, 从而减少有机碳的损失<sup>[5]</sup>。施肥、耕作、土地利用方式的改变以及种植制度等因素均会影响土壤团聚体中有机碳、全氮的分布, 且以施肥对它们的影响最显

著<sup>[6-7]</sup>。众所周知, 土壤是地球陆地生态系统中最大的有机碳库, 其库容微小的变化都会对大气中的碳浓度产生巨大的影响<sup>[8]</sup>。因此, 通过合理的田间管理措施维持并增强土壤有机碳固存对于缓解温室气体排放、提升土壤质量、促进作物高产稳产有重要意义。

农田土壤是受人类活动影响较频繁的土壤类型之一<sup>[9]</sup>, 近年来国内外就施肥对土壤团聚体中有机碳和全氮含量的影响已有不少报道, 但是研究结果不尽相同。苏慧清等<sup>[10]</sup>利用棕壤36 a定位试验发现, 有机碳和全氮主要分布在粉黏粒组分(<0.053 mm)中, 长期施化肥显著提高了<0.053 mm组分中有机碳和全氮含量, 却显著降低了大团聚体(0.5~1 mm)中有机碳和全氮含量, 而无论是单施有机肥还是有机无机肥配施均显著提高了0.5~1 mm团聚体中碳氮含量。但是Xie等<sup>[11]</sup>通过中国西北地区壤土21 a定位肥料试验研究发现, 有机碳和全氮主要固存在微团聚体(<0.25 mm)中, 化肥及有机无机肥配施处理均显著提高了大团聚体(>2、>0.25~2 mm)和微团聚体(<0.25 mm)中有机碳和全氮含量。此外, 张艺等<sup>[12]</sup>报道, 连续30 a在红壤性水稻土上施有机肥, 有机碳主要贮存

收稿日期: 2020-06-18 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(41807102; U1710255-3)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0363)、山西农业大学科技创新基金(青年科技创新项目(2019004)和山西省优秀博士来晋工作奖励(SXYBK201805)资助

作者简介: 曹寒冰, 博士, 讲师, 研究方向为高效施肥与土壤质量提升。

Email: caohanbing119@163.com

\*通信作者: 孟会生, 博士, 副教授, 研究方向为矿区土壤治理与生物修复。

Email: huishengmeng@126.com

在大粒径大团聚体 ( $> 2 \text{ mm}$ ) 中, 而长期施化肥肥后显著提高了小粒径大团聚体 ( $>0.25 \sim 2 \text{ mm}$ ) 中有机碳储量。由此可见, 施肥对不同土壤类型团聚体中有机碳、全氮含量的影响并不一致, 不同粒径的团聚体对协调、供应土壤养分, 增强土壤固碳能力等方面发挥的作用不尽相同<sup>[9]</sup>。造成研究结果之间的差异, 可能与施肥历史、土壤性质、种植体系、气候条件等因素有关。因此, 有必要针对性地开展系统研究。

山西省煤炭资源尤其丰富, 是中国开采量比例最大的省份之一, 据统计, 每年原煤产量能达到全国的 1/4 以上。随着时代的发展, 煤炭资源开采在支撑社会经济发展的同时, 也对土地资源和生态环境造成了持久而严重的负面影响<sup>[13]</sup>。据统计, 山西因煤炭开采而损毁的耕地已超 11 万  $\text{hm}^2$ 。采煤塌陷区复垦土壤是被井工开采破坏耕地后而进行重构的一种土壤类型, 其层次和结构均已发生了明显的变化, 由于重构土壤就近取自于采煤塌陷区周边黄土质生土, 其物理结构、化学性质以及微生物类群均处于初期构建阶段, 与一般农田土壤有显著差异。因此, 将破坏的土地复垦和重新利用, 是缓解该区域人地矛盾的关键途径, 甚至可以应对中国粮食安全面临的严峻挑战<sup>[14]</sup>。前人针对复垦土壤有机碳固存机制的研究主要在团聚体中有机碳和全氮分布对施肥的响应<sup>[15-16]</sup>, 而就驱动因素及其与作物产量的关系仍不清楚。因此, 本研究以山西省东南部长治市襄垣县复垦 6 a 的土壤为研究对象, 分析不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量的变化特征, 评估有机碳和全氮在其中的富集状况, 判断土壤有机碳储量变化的驱动因子, 并探究作物产量与各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的关系, 以期深入认知复垦生态工程和培肥改良措施对土壤结构与质量的影响过程和机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于山西省长治市襄垣县王桥镇 ( $36^{\circ}28'11.95''\text{N}$ ,  $113^{\circ}00'52.57''\text{E}$ , 平均海拔 980 m), 属潞安集团五阳煤矿井田范围, 煤矿开采导致地面沉陷后地形呈马鞍状, 最大落差为 4~5 m, 马鞍状峰距为 150~180 m, 水浇地变成了旱薄地, 土地生产力严重下降。该区属于低山黄土丘陵区, 属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温  $9.5^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量 532.8 mm。供试土壤类型为石灰性褐土, 黄土母质。试验开始前 0~20 cm 耕层土壤基本理化性质如表 1 所示。图 1 为研究区位置示意图。

表 1 2008 年耕层土壤 (0~20 cm) 基本理化性质

Table 1 Physical-chemical properties at 0-20 cm soil depth in 2008

pH 值 pH value	容重 Bulk density ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	有机碳 Soil organic carbon ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮 Total nitrogen ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效磷 Available phosphorus ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available potassium ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
8.3	1.49	4.20	0.50	2.01	106.85

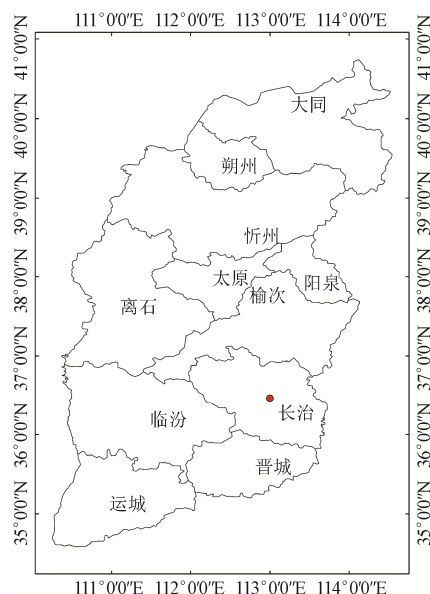


图 1 试验区位图

Fig. 1 Experimental site location

### 1.2 试验设计

试验开始于 2008 年, 选择塌陷年限相同且塌陷后地形基本一致的塌陷地, 采用混推复垦的方式, 将表土剥离 50~100 cm, 利用挖深垫浅、就地平整法对其进行复垦, 种植作物为春玉米 (大丰 30 号), 种植密度为 60 000 株/ $\text{hm}^2$ , 并于每年 5 月左右播种, 10 月左右收获, 且在收获时将玉米秸秆全部粉碎、翻压还田。从 2013 年开始进行第 6 年复垦, 不同处理下 0~20 cm 耕层土壤的基本理化性状见表 2。

表 2 复垦 6a 时不同处理下 0~20 cm 土层的基本性质

Table 2 Basic properties of 0-20 cm soil layer under various treatment in 6 years of reclamation

处理 Treatment	pH	有机碳 SOC ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮 TN ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	有效磷 AP ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 AK ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
对照 CK	8.40	6.61	1.09	5.40	131.28
平衡施肥 NPK	7.99	6.21	1.06	22.03	310.38
单施有机肥 M	8.22	7.98	1.20	37.83	212.69
有机无机肥配施 MNPK	8.27	8.82	1.08	80.53	294.10

本研究包括 4 个处理, 分别是不施肥 (CK)、平衡施肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、有机无机肥配施 (MNPK)。供试肥料为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12%) 和氯化钾 (含  $\text{K}_2\text{O}$  60%), 氮、磷、钾肥和有机肥均作为基肥在玉米播种前一周一性撒施, 随即翻耕入土。此外, 另取未复垦生土 (即 0 年) 作为培肥效果对照。每个处理按照完全随机区组设计, 重复 3 次, 小区面积为  $10 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 50 \text{ m}^2$ 。除了 CK 处理外, 各施肥处理依据等质量养分施肥原则 (表 3)。试验供试的有机肥为完全腐熟的鸡粪, 其中含有机碳: 14.97%、氮: 1.68%、磷: 2.46% 和钾: 1.35%。

### 1.3 样品采集与分析

春玉米收获前一天 (2018 年 9 月 29 日), 用定制的铁刀 (高度为 10 cm、直径为 10 cm) 采集 0~20 cm 土层

的原状土样，每个小区采集 5 个样点，然后混合成 1 个样品。带回实验室后，沿土壤结构小心地掰成 < 1 cm 的土块，剔除动植物残体及石块，过 8 mm 筛后，于通风干燥处风干，装入塑封袋中备用。

表 3 不同农田管理措施下肥料用量

Table 3 Rate of chemical fertilizers and manure in various agriculture management regimes kg·hm<sup>-2</sup>

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizers			有机肥 Manure
	氮 N	磷 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	钾 K <sub>2</sub> O	
CK	0	0	0	0
NPK	201.5	184.8	98.4	0
M	0	0	0	12 000
MNPK	100.8	92.4	49.2	6 000

同时，春玉米收获后，每个小区用土钻（高度为 20 cm、内径约为 2.5 cm）采集 0~20 cm 土层土壤样品 6 个并混合，装入塑封袋中带回实验室，在阴凉通风处自然风干后剔除石块、根系等杂物，研磨后过 0.15 mm 筛，保存在塑封袋中测定土壤基本理化性状。

采用 Elliott 等<sup>[17]</sup>提出的湿筛方法分离得到水稳性团聚体及粉黏粒组分，具体操作方法如下：首先准备好 2、0.25 和 0.053 mm 孔径的筛子，并按照大粒径在上、小粒径在下的顺序摆放好，其次称取 50 g 过 8 mm 筛的风干土样置于此套筛上，然后缓慢地将整套筛子放在装满 2/3 蒸馏水的桶中心，浸泡 5 min，上下震荡 5 min，振幅为 3 cm，最后将各个筛子中的土样用蒸馏水小心地洗入已知重量的铝盒中，同时向桶中加入 0.2 mol/L CaCl<sub>2</sub> 絮凝，再离心收集这部分土样，上述所有收集的土样于 50 °C 烘至恒定的质量，冷却后称质量，即可得到 > 2、>0.25~2、0.053~0.25 mm 粒径的团聚体和 < 0.053 mm 的粉黏粒组分，磨细过 0.15 mm 筛装入塑封袋中用于后续测定 OC 和 TN 含量。

#### 1.4 测定项目及方法

土壤及各粒径土壤团聚体中有机碳含量采用重铬酸钾-容量法测定<sup>[18]</sup>，全氮含量采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CuSO<sub>4</sub>-Se 催化剂和浓硫酸消煮，半微量开氏法测定<sup>[18]</sup>，速效磷采用碳酸氢钠浸提经连续流动分析仪测定<sup>[18]</sup>，速效钾采用醋酸铵浸提——火焰光度法测定<sup>[18]</sup>。

#### 1.5 计算方法

土壤团聚体及粉黏粒组分的有机碳富集系数和全氮富集系数计算公式如下：

$$E_C = \text{SOC}_a / \text{SOC} \quad (1)$$

$$E_N = \text{TN}_a / \text{TN} \quad (2)$$

式中  $E_C$  和  $E_N$  分别代表土壤团聚体及粉黏粒组分的有机碳富集系数和全氮富集系数； $\text{SOC}_a$  为土壤团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量，g/kg； $\text{TN}_a$  为土壤团聚体及粉黏粒组分中全氮含量，g/kg。SOC 为土壤有机碳含量，g/kg，TN 为土壤全氮含量，g/kg。

为了明确团聚体对土壤总有机碳储量的贡献率，本文采用如下方法进行计算：

$$F1 = M \cdot \Delta C \quad (3)$$

$$F2 = \Delta M \cdot C \quad (4)$$

式中  $F1$  和  $F2$  分别表示引起土壤有机碳储量变化的 2 个驱

动因子，其中  $F1$  是由团聚体中有机碳含量变化所驱动的土壤有机碳储量变化， $F2$  是由团聚体的数量变化所驱动的土壤有机碳储量变化。如果  $F1 > F2$ ，说明土壤有机碳储量的变化是由该粒径团聚体或粉黏粒组分中有机碳含量的变化所引起的；反之，则说明是由该粒径团聚体或粉黏粒组分的数量所引起的。 $M$  为生土的团聚体分布比例，%； $\Delta M$  为各处理下复垦后引起的团聚体分布比例的变化值，%； $C$  为各处理下复垦后团聚体中有机碳含量，g/kg； $\Delta C$  为各处理下复垦后引起的团聚体中有机碳含量的变化差值，g/kg。

#### 1.6 数据处理

试验结果采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理，不同处理下作物产量、水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量、 $E_C$  和  $E_N$  值以及 C/N 比采用 LSD 法进行差异性检验。利用 Origin 8.1 软件作图。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同施肥措施下玉米籽粒产量

整个试验周期（2008—2013 年），各处理中玉米籽粒平均产量的变幅范围分别从 725.70 kg/hm<sup>2</sup> 到 3 745.70 kg/hm<sup>2</sup> (CK)，1 440.75 kg/hm<sup>2</sup> 到 6 218.80 kg/hm<sup>2</sup> (NPK)，2 577.30 kg/hm<sup>2</sup> 到 7 944.70 kg/hm<sup>2</sup> (M)，2 259.60 kg/hm<sup>2</sup> 到 8 156.65 kg/hm<sup>2</sup> (MNPK)，平均产量的变化范围从 3 086.47 kg/hm<sup>2</sup> 到 6 668.87 kg/hm<sup>2</sup>。同对照 (CK) 相比，施化肥 (NPK)、单施有机肥 (M) 以及有机无机肥配施 (MNPK) 均显著提高了玉米籽粒产量，且以 MNPK 处理的效果最显著（表 4），分别比对照提高了 79.49%、116.07% 和 113.85%。由此可见，连续多年有机无机肥配施有利于作物增产。

表 4 连续 6 a 复垦不同施肥措施下玉米籽粒产量

Table 4 Maize grain yields under various fertilization regimes after 6 years reclamation kg·hm<sup>-2</sup>

年份 Year	处理 Treatment			
	CK	NPK	M	MNPK
2009	725.7±22.74c	1 440.75±85.12b	2 577.30±150.69a	2 259.60±102.89a
2010	2 144.85±149.34c	4 109.40±224.28b	4 826.10±245.95a	4 728.45±254.84a
2011	3 600.05±126.59c	5 352.65±121.39b	6 378.20±160.83a	6 341.50±104.15a
2012	3 753.95±208.89d	7 871.85±228.12c	9 594.85±209.62b	9 056.10±421.68a
2013	3 745.70±112.53c	6 218.80±323.32c	7 944.70±367.40b	8 156.65±238.69a

注：不同小写字母表示同一年份不同处理间达 5% 显著水平。

Note: Different lowercase letters for the same year mean significant differences between treatments at the 5% probability level.

#### 2.2 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分的分布比例

施肥措施及施肥年限下土壤团聚体分布比例的两因素方差分析结果显示（表 5），施肥措施并没有影响各粒径团聚体及粉黏粒组分的分布比例，而复垦年限对各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的分布比例产生了显著影响。随着复垦时间的延长，各处理中 0.053~0.25 mm 团聚体和 < 0.053 mm 组分的分布比例均呈降低的趋势。复垦 6 a CK 处理中 > 2 mm 团聚体的分布比例是 0 年的 3 倍。

表 5 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分的分布比例

Table 5 Weight distribution of soil water stable aggregates and silt and clay fractions under various fertilization regimes %

复垦 年限 Recla- mation year	粒径 大小 Partial size /mm	处理 Treatment				Y	T	Y×T
		CK	NPK	M	MNPK			
0	>2	6.23±0.47 b	6.23±0.47 a	6.23±0.47 a	6.23±0.47 a	*		
6	>2	20.84±3.96 a	21.66±1.62 a	11.84±1.61 a	10.75±1.56 a	*	ns	ns
0	>0.25~	48.51±4.80 a	48.51±4.80 a	48.51±4.80 a	48.51±4.80 a	*		
6	>0.25~	50.06±7.69 a	54.65±6.32 a	57.91±5.40 a	62.61±4.06 a	*	ns	ns
0	0.053~	22.42±3.32 a	22.42±3.32 a	22.42±3.32 a	22.42±3.32 a	*		
6	0.053~	18.25±3.07 a	11.43±3.92 a	17.29±3.18 a	14.21±2.85 a	*	ns	ns
0	<0.053	22.84±1.68 a	22.84±1.68 a	22.84±1.68 a	22.84±1.68 a	*		
6	<0.053	10.85±1.44 a	12.26±1.05 a	12.97±2.83 a	12.43±1.79 a	*	ns	ns

注：不同小写字母表示同一粒径年间间 5% 显著水平。Y 为复垦年限，T 为施肥处理，Y×T 为复垦年限与施肥处理的交互效应。\* 为  $P < 0.01$ ，ns 为不显著。  
Note: Different lowercase letters for the same aggregate size fraction mean significant differences between years at the 5% probability level. Y means reclamation years, T means fertilization treatments, Y×T means interactive effects of reclamation years and fertilization years. \* means  $P < 0.01$ , ns means no significant differences.

### 2.3 土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量

不同施肥措施下各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量总体高于生土，且施有机肥处理（M 和 MNPK）的水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量增幅更大（图 2a）。而就不同粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分而言，各粒径团聚体中有机碳含量相近，总体高于粉黏粒组分。

同生土相比，CK 和 NPK 处理均显著提高了 >0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和 <0.053 mm 组分中有机碳含量，增幅分别为 87.07%~97.96%、66.19%~92.09% 和 92.80%~97.60%。M 处理亦显著提高了 >0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和 <0.053 mm 组分中有机碳含量，增幅分别为 95.24%、148.20% 和 112.00%。MNPK 处理显著提高了 >2、>0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和 <0.053 mm 组分中有机碳含量，分别为生土的 2.52 倍、2.61 倍、2.35 倍和 1.93 倍。

综上，MNPK 处理对于提高大团聚体（>2 和 >0.25~2 mm）中有机碳含量效果最明显，M 处理对于提高微团聚体（0.053~0.25 mm）和粉黏粒组分（<0.053 mm）中有机碳效果最明显。

### 2.4 土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中全氮含量

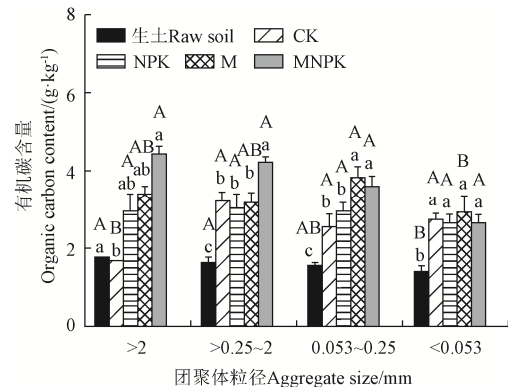
不同施肥措施下各粒径水稳性团聚体中全氮含量均显著高于生土，变化趋势与有机碳一致（图 2b）。但是所有处理较生土均对 <0.053 mm 组分中全氮含量无显著影响。同生土相比，CK 和 NPK 处理均显著提高了 >2、>0.25~2 和 0.053~0.25 mm 团聚体中全氮含量，增幅分别为 41.83%~43.66%、46.78%~52.35% 和 29.95%~30.43%。M 和 MNPK 处理亦均显著提高了 >2、>0.25~2 和 0.053~0.25 mm 团聚体中全氮含量，增幅分别为 52.81%~63.80%、50.43%~62.96% 和 39.61%~44.93%。

综上，MNPK 处理对于提高大团聚体（>2 mm 和 >0.25~2 mm）中全氮含量效果最明显，M 处理对于提高微团聚体（0.053~0.25 mm）中全氮含量效果最明显。

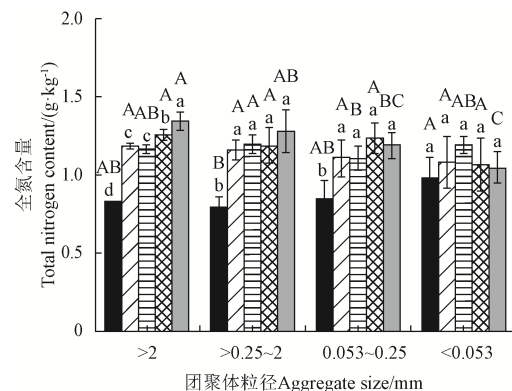
### 2.5 土壤团聚体及粉黏粒组分有机碳和全氮富集系数

长期不同施肥措施在一定程度上影响了各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的有机碳富集系数（ $E_C$  值）（表 6）。

总体看来，大团聚体和微团聚体的  $E_C$  值相近（除 CK 处理外），而粉黏粒组分的  $E_C$  值小于各粒径团聚体。同生土相比，CK 处理显著降低了 >2 mm 团聚体的  $E_C$  值，达 46.94%。MNPK 处理显著降低了 <0.053 mm 组分的  $E_C$  值，达 23.08%。而其余施肥处理对各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的  $E_C$  值无显著影响。



a. 有机碳含量  
a. Organic carbon content



b. 全氮含量  
b. Total nitrogen content

注：不同小写字母表示同一粒径不同处理间 5% 显著水平；不同大写字母表示同一处理不同粒径间 5% 显著水平。

Note: Different lowercase letters for the same aggregate size fraction mean significant differences among treatments at the 5% probability level. Different uppercase letters for the same treatment mean significant differences between aggregate size fractions at the 5% probability level.

图 2 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量

Fig.2 Organic carbon and total nitrogen content of soil water-stable aggregates and silt and clay fractions under various fertilization regimes

长期不同施肥措施对 >2 mm 和 >0.25~2 mm 团聚体的全氮富集系数（ $E_N$  值）产生了显著影响，而对 0.053~0.25 mm 团聚体及 <0.053 mm 组分的  $E_N$  值无显著影响（表 6）。同生土相比，CK 和 NPK 处理显著提高了 >2 mm 和 >0.25~2 mm 团聚体的  $E_N$  值，增幅分别为 17.00%~19.21% 和 19.70%~28.14%。M 和 MNPK 处理亦显著提高了 >2 mm 和 >0.25~2 mm 团聚体的  $E_N$  值，增幅分别为 13.33%~34.58% 和 11.68%~33.37%，且以 MNPK 处理的增幅最大。

### 2.6 土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分的碳氮比

不同施肥措施显著影响了各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的 C/N 比（除 >2 mm 团聚体）（表 7）。同生土相比，CK 处理显著提高了 >0.25~2 mm 团聚体和 <0.053 mm 组分的 C/N 比，分别提高了 34.10% 和 79.66%。NPK 处理



显著提高了 0.053~0.25 mm 团聚体的 C/N 比, 达 46.11%。M 和 MNPK 处理均显著提高了>0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分的 C/N 比, 增幅分别为 29.81%~60.81%、67.70%~71.32%和 81.32%~97.45%。

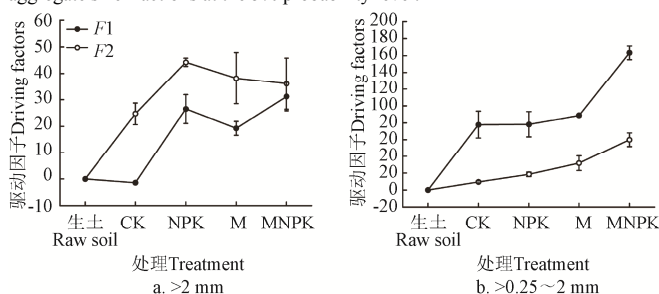
表 6 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分的有机碳富集系数和全氮富集系数

Table 6 Organic carbon enrichment factor ( $E_C$ ) and total nitrogen enrichment factor ( $E_N$ ) of soil water-stable aggregates and silt and clay fractions under various fertilization regimes

富集系数 Enrichment factor	处理 Treatment	团聚体粒径 Aggregate size			
		> 2 mm	>0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
有机碳富集系数 $E_C$	生土	0.49±0.01 a A	0.46±0.04 a A	0.43±0.03 ab AB	0.39±0.04 a B
	CK	0.26±0.00 b B	0.49±0.09 a A	0.39±0.05 a B	0.41±0.02 a A
	NPK	0.48±0.07 ab A	0.49±0.05 a A	0.48±0.04 a A	0.43±0.04 a A
	M	0.43±0.02 ab AB	0.40±0.03 a AB	0.48±0.04 a A	0.37±0.06 ab B
	MNPK	0.50±0.03 a A	0.48±0.02 a A	0.41±0.03 ab A	0.30±0.06 b A
全氮富集系数 $E_N$	生土	0.92±0.03 c AB	0.88±0.06 c B	0.96±0.15 a AB	1.10±0.18 a A
	CK	1.08±0.03 b A	1.06±0.08 ab A	1.01±0.09 a A	0.99±0.16 a A
	NPK	1.10±0.03 b AB	1.13±0.10 ab A	1.05±0.12 a B	1.12±0.10 a A
	M	1.05±0.03 b A	0.99±0.10 bc A	1.03±0.09 a A	0.89±0.14 a A
	MNPK	1.24±0.03 a A	1.18±0.06 a A	1.09±0.04 a AB	0.96±0.04 a B

注: 不同小写字母表示同一粒径不同处理间达 5%显著水平; 不同大写字母表示同一处理不同粒径间达 5%显著水平。

Note: Different lowercase letters for the same aggregate size fraction mean significant differences among treatments at the 5% probability level. Different uppercase letters for the same treatment mean significant differences between aggregate size fractions at the 5% probability level.



注:  $F_1$  表示团聚体中有机碳含量的变化;  $F_2$  表示团聚体数量的变化。

Note:  $F_1$  represents the change of organic carbon content in the aggregate;  $F_2$  represents the change of aggregates number.

图 3 不同施肥措施下复垦土壤有机碳储量变化的驱动因子

Fig.3 Driving factors for the change of reclaimed soil organic carbon stock under various fertilization regimes

## 2.8 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分有机碳含量与作物产量的关系

由图 4 a 可知, 随着土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分有机碳含量的增加, 玉米产量显著增加。当土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分有机碳含量每增加 1 g/kg 时, 玉米产量增加 2 517 kg/hm<sup>2</sup>。进一步分析后发现, 0.053~0.25 mm 团聚体有机碳含量与作物籽粒产量之间的关

系最密切 (图 4 d), 当该粒径团聚体有机碳含量增加 1 g/kg 时, 作物产量可以增加 3 074 kg/hm<sup>2</sup>; 其次是> 2 mm 团聚体与作物产量的关系较为密切 (图 4 b), 当该粒径团聚体有机碳含量增加 1 g/kg 时, 作物产量可以增加 2 245 kg/hm<sup>2</sup>。然而>0.25~2 mm 团聚体 (图 4 c) 和<0.053 mm 组分 (图 4 e) 中有机碳含量对作物产量无显著影响。

表 7 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分的碳氮比

Table 7 C/N ratios of soil water-stable aggregates and silt and clay fractions under various fertilization regimes

处理 Treatment	团聚体粒径 Aggregate size			
	> 2 mm	>0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
生土	2.15±0.00 ab A	2.07±0.02 c AB	1.83±0.19 c B	1.44±0.20 b C
CK	1.43±0.02 b B	2.78±0.18 ab A	2.32±0.16 bc A	2.58±0.49 a A
NPK	2.54±0.40 ab A	2.55±0.38 bc A	2.67±0.07 ab A	2.25±0.18 ab A
M	2.73±0.19 ab A	2.69±0.09 b A	3.13±0.46 a A	2.84±0.11 a A
MNPK	3.27±0.19 a A	3.33±0.33 a A	3.06±0.27 a A	2.61±0.39 a A

## 2.7 不同施肥措施下复垦土壤团聚体及粉黏粒组分有机碳储量的驱动因子

由图 3 可知, 经过不同的施肥措施管理农田后, >2 mm 团聚体的  $F_2$  值显著高于  $F_1$  值, 而>0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分的  $F_2$  值均显著低于  $F_1$  值。其中, 在> 2 mm 团聚体中, 各处理下的  $F_2$  值均显著高于生土,  $F_1$  值亦均显著高于生土 (除 CK 处理外)。>0.25~2 mm 团聚体中各处理下的  $F_1$  值和  $F_2$  值亦显著高于生土。但是在 0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分中, 各处理下的  $F_1$  值显著高于生土, 而  $F_2$  值显著低于生土。

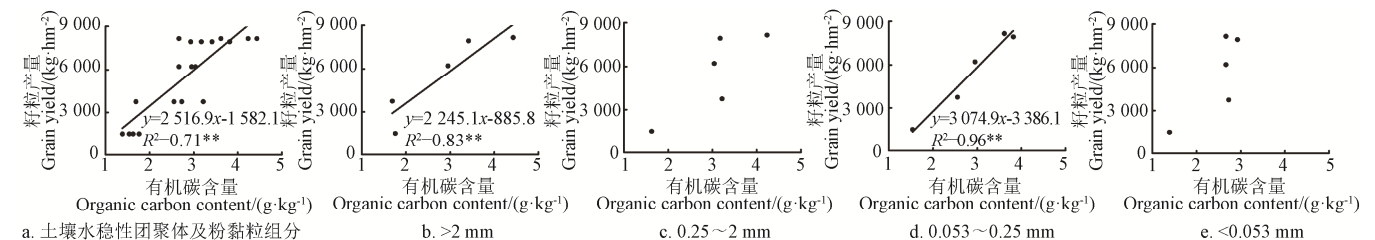
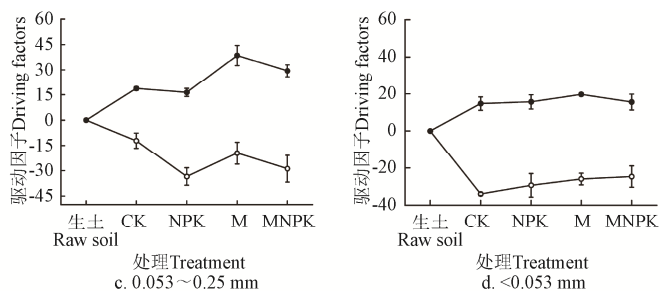


图 4 土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分有机碳含量与复垦第 6 年作物产量的关系

Fig. 4 Relationships between yields of 6 years reclamation and organic carbon contents of soil water-stable aggregates and silt and clay fractions

### 3 讨 论

#### 3.1 不同施肥措施对复垦土壤水稳性团聚体中有机碳固存的影响

土壤团聚体作为土壤有机质储存的仓库: 表层土壤有机碳 90%以上贮存在团聚体中, 团聚体的团聚作用对实现农田土壤有机碳固存具有重要意义<sup>[5]</sup>。本研究结果显示, 不同施肥措施下复垦土壤各粒径水稳性团聚体中有机碳和全氮含量总体均显著高于生土, 且随着外源碳投入量的增加呈上升趋势, 特别是有机无机肥配施处理(MNPK)对大团聚体(> 2 mm 和>0.25~2 mm)中有机碳和全氮含量有明显的提升效果(图 2)。而粉黏粒组分(< 0.053 mm)中有机碳和全氮含量维持在一个相对稳定的水平, 无明显变化。此外, 大团聚体和微团聚体中有机碳和全氮含量相近, 但是总体高于< 0.053 mm 组分的。这与多数研究结果类似<sup>[10,19]</sup>。他们也发现, 长期有机无机肥配施(MNPK)较不施肥(CK)均显著提高了红壤和棕壤上各粒径水稳性团聚体中有机碳或全氮含量, 尤其是> 0.25 mm 团聚体。不难理解, 外源有机质的输入增加了土壤有机质含量, 有机质中的胶结物质与土壤颗粒形成团聚体, 继而增加了团聚体中有机碳含量<sup>[20]</sup>。虽然生土、CK 和 NPK 处理下有机碳投入量均来源于作物残茬, 但是 CK 和 NPK 处理下作物产量显著高于生土, 且 NPK 处理对作物增产的效果优于 CK 处理(表 4), 所以归还到农田中的碳投入量也多, 而 M 以及 MNPK 处理下土壤有机碳投入量除了来源于作物的, 还有相当一部分是来源于本身—有机肥。故施有机肥的处理对团聚体中有机碳及全氮含量的提升效果最优。曾有研究报道大团聚体中有机碳含量与土壤肥力呈正相关<sup>[21]</sup>, 因此 MNPK 处理是当前复垦土壤土质提升的最佳措施。

不同施肥措施之间< 0.053 mm 组分中有机碳和全氮含量无明显变化, 说明该组分已接近或达到了碳氮饱和水平。苑亚茹等<sup>[22]</sup>在黑土上也报道, 同施化肥相比, 连续 11 a 不同剂量的有机肥与化肥配施对<0.053 mm 组分中有机碳含量无显著影响。Kool 等<sup>[23]</sup>在团聚体层级发育模型的基础上提出了土壤有机碳的等级饱和模型, 即团聚体中有机碳含量并没有随着外源碳投入量的增加呈线性趋势, 最小粒径的团聚体首先饱和, 最大粒径的团聚体最后饱和, 最终土壤有机碳库达到饱和。各粒径水稳性团聚体中有机碳和全氮含量之间无显著差异, 这与 Li 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致, 可能是因为团聚体中有机碳和全氮的“浓缩效应”<sup>[24]</sup>。

前人通过计算元素富集系数(Element enrich factors,  $E$ )来比较不同施肥措施下各粒径团聚体及粉黏粒组分中碳氮的分布状况。当 $E > 1$ 时, 说明土壤组分富集碳和氮, 反之, 当 $E < 1$ 时, 说明土壤组分中这 2 种元素已损失<sup>[25-26]</sup>。本研究结果表明, 生土和复垦土壤中各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的 $E_C$ 值均小于 1(表 6), 而 $E_N$ 值接近或大于 1。同生土相比, MNPK 处理总体提高了大团聚体的 $E_C$ 和 $E_N$ 值, 但降低了< 0.053 mm 组分的 $E_C$ 和 $E_N$ 值(表 6)。说明该区域土壤中活性有机碳首先发生了矿化,

且矿化程度较高, 氮素在土壤中的累积程度高于有机碳。这一方面是因为玉米生长于高温多雨的夏季, 集中降水冲刷及强光暴晒均会加快土壤有机碳的分解; 另一方面是因为生土或者复垦土壤上, 自身土壤肥力的限制, 再加上外源补充碳不足导致的。值得注意的是, 氮素的大量累积一部分被作物吸收利用, 一部分因挥发或淋溶而损失, 还有一部分便残留在土壤中, 至地下水 and 土体的环境风险增加<sup>[27]</sup>, 有关这方面的研究有待于后续开展。

有机肥的输入为土壤中微生物的活动提供了能量, 导致了很强的正激发效应<sup>[28]</sup>, 使得< 0.053 mm 组分中的碳氮已损失(表 6), 此时粉黏粒组分中的有机碳和全氮已经向团聚体中转移。可见, 本研究所在区域的土壤上, 团聚体中有机碳和全氮受化学保护作用是有限的, 而有机碳和全氮主要受团聚体的物理保护作用。这与多数人的研究结果一致<sup>[29-31]</sup>。邵兴芳<sup>[29]</sup>在黑土旱地的团聚体氮矿化研究结果表明, < 0.053 mm 组分中氮矿化量明显高于各大小粒径团聚体的。杨洪波等<sup>[30]</sup>也发现了同样的现象: < 0.053 mm 组分比大团聚体中含有更多的易矿化有机氮。Craswell 等<sup>[31]</sup>将不同粒径土壤团聚体培养后发现, 随着团聚体粒径的减小, 其中的氮矿化率逐渐增大。所以, MNPK 处理下< 0.053 mm 组分中的碳氮易先发生矿化现象。

#### 3.2 不同施肥措施对复垦土壤水稳性团聚体中 C/N 比的影响

土壤 C/N 比值是评价有机物分解程度的一个指标, 比值越低, 说明有机物的分解程度越高, 可供微生物利用的碳源较少, 微生物的活性降低, 从而影响养分的有效性; 反之则表示有机碳累积程度高<sup>[27]</sup>。本研究显示, M 和 MNPK 处理较生土均显著提高了各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的 C/N 比(除> 2 mm 团聚体外)(表 7), 这与苏慧清等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。但是不同施肥措施下复垦土壤各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分的 C/N 比均低于一般农田, 这可能是因为矿区复垦土壤由于其物理结构、化学性质以及微生物类群均处于初期构建阶段, 培肥时间还较短, 与一般农田土壤有所差异。因此, 可通过增加土壤中的有机碳含量来提高土壤的 C/N 比, 前人研究报道, 减氮运筹下增施有机肥, 能够使有机碳增加 9%~54%<sup>[32-33]</sup>。

#### 3.3 不同施肥措施下复垦土壤团聚体中有机碳固存的驱动因素

土壤各粒级团聚体中有机碳含量是土壤有机物质平衡和转化速率的微观表征, 对于土壤肥力和土壤碳固存具有双重意义<sup>[21]</sup>。本研究结果显示, 长期复垦后土壤有机碳储量增加, 是因为表层土壤> 2 mm 团聚体的数量增加, 其次才依赖于该粒径团聚体中有机碳含量的增加(图 2 a)。正如本研究中表 5 所示, 随着复垦时间的延长, 各施肥处理下大团聚体的数量呈增加趋势。对于>0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和< 0.053 mm 组分来讲, 它们中的有机碳含量对土壤有机碳储量提升的作用大于它们的数量。这也潜在说明复垦过程中团聚体中有机碳发生了再分配过程。王兴等<sup>[21]</sup>的研究也表明, 植被恢复可以

加速有机碳从细颗粒组分向较大粒径的组分中转移,即有机碳的在分配过程,这种转化主要是由于在植被恢复过程中加速了细颗粒组分易于和土壤大团聚体结合,从而使有机碳受到保护,不易被微生物所分解。

### 3.4 不同施肥措施对复垦土壤上作物产量的影响

作物产量是农田土壤生产力的最直接体现,是农田土壤肥力变化的最有力指示物。本研究结果表明,同生土相比,不同施肥措施均显著提高了作物产量,且以 MNPK 处理效果最显著(表 4)。与 Xie 等<sup>[34]</sup>在壤土上的研究结果一致,连续 35 a 有机无机肥配施显著提高了小麦和玉米籽粒产量。有机无机肥配施能够优化土壤结构,补充和平衡土壤养分,提高土壤肥力,最终提升作物产量。

本研究结果还显示,作物产量随着土壤水稳性团聚体及粉粘黏粒组分中有机碳含量的增加呈线性增加,且以 0.053~0.25 mm 组分中有机碳含量与作物产量之间的关系最密切,其次是>2 mm 团聚体,如前所述,本研究所在区域的土壤上,团聚体对有机碳的物理保护作用发挥着主要作用,提升了土壤肥力,进而促进了作物增产。研究报道土壤有机碳含量与作物产量之间呈线性相关关系<sup>[35]</sup>,说明该区域土壤有机碳库还未达到饱和水平,这主要是因为该土壤初始有机碳水平较低<sup>[36]</sup>,因此,仍然可以继续向该土壤上补充碳源。关于复垦褐土有机碳的饱和点,尚有待于进一步深入研究。

## 4 结 论

1) 整个试验周期(2008—2013 年),同 CK 相比,NPK、M 以及 MNPK 处理均显著提高了玉米籽粒产量,且以 MNPK 处理的效果最显著,分别提高了 79.49%、116.07%和 113.85%。

2) 同生土相比,不同施肥措施均显著提高了复垦土壤各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量(除<0.053 mm 组分中全氮含量外),且以有机无机肥配施处理(MNPK)对提高大团聚体(>2 mm 和>0.25~2 mm)中有机碳和全氮含量效果最明显,单施有机肥处理(M)对提高微团聚体(0.053~0.25 mm)中有机碳和全氮效果最明显。各粒径团聚体中有机碳和全氮含量相近,总体高于粉黏粒组分(<0.053 mm)。

3) >2 mm 粒径团聚体对复垦土壤有机碳储量提升的贡献在于其数量的增加,而>0.25~2、0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分对土壤有机碳储量提升的贡献在于其有机碳含量的增加。

4) 作物产量随着复垦土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的增加呈线性增加,说明土壤有机碳库仍未饱和。当土壤有机碳含量增加 1 g/kg 时,作物产量提高 2 517 kg/hm<sup>2</sup>。且以 0.053~0.25 mm 团聚体中有机碳含量与作物产量的关系最密切。

### 【参 考 文 献】

- [1] Haydu-houdeshell C, Graham R, Hendrix P, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California[J]. Geoderma, 2018, 310: 201-208.
- [2] 张迪,姜佰文,梁世鹏,等. 草甸黑土团聚体稳定性对耕作与炭基肥施用的响应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 125-132.  
Zhang Di, Jiang Baiwen, Liang Shipeng, et al. Responsive of aggregate stability of meadow black soil to different tillage practices and carbon-based fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 125-132. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李文军,杨基峰,彭保发,等. 施肥对洞庭湖平原水稻土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.  
Li Wenjun, Yang Jifeng, Peng Baofa, et al. Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20): 4007-4015. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘振东,李贵春,周颖,等. 无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2239-2245.  
Liu Zhendong, Li Guichun, Zhou Ying, et al. The effect of fertilizer management practices on distribution of aggregates and SOC[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2239-2245. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李昊昱,孟兆良,庞党伟,等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 893-903.  
Li Haoyu, Meng Zhaoliang, Pang Dangwei, et al. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(6): 893-903. (in Chinese with English abstract)
- [6] Graf-rosenfellner M, Cierjacks A, Kleinschmit B, et al. Soil formation and its implications for stabilization of soil organic matter in the riparian zone[J]. Catena, 2016, 139: 9-18.
- [7] 邵慧芸,李紫玥,刘丹,等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4691-4699.  
Shao Huiyun, Li Ziyue, Liu Dan, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4691-4699. (in Chinese with English abstract)
- [8] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 80-99.
- [9] 刘杰,马艳婷,王宪玲,等. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3361-3368.  
Liu Jie, Ma Yanting, Wang Xianling, et al. Impact of land use type on the stability and organic carbon content of soil aggregates in the Weibei dryland[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3361-3368. (in Chinese with English abstract)
- [10] 苏慧清,韩晓日,杨劲峰,等. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 924-932.  
Su Huiqing, Han Xiaori, Yang Jinfeng, et al. Effect of long-term fertilization on distribution of aggregates and organic carbon and total nitrogen contents in a brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 924-932. (in Chinese with English abstract)

- [11] Xie J, Hou M, Zhou Y, et al. Carbon sequestration and mineralization of aggregate-associated carbon in an intensively cultivated anthrosol in north China as affected by long term fertilization[J]. *Geoderma*, 2017, 296: 1-9.
- [12] 张艺, 戴齐, 尹力初, 等. 后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 969-976.  
Zhang Yi, Dai Qi, Yi Lichu, et al. Effects of following-up fertilization reforming on distribution and turnover of aggregate-associated organic carbon in paddy soils[J]. *Soils*, 2017, 49(5): 969-976. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. *科技导报*, 2009, 27(17): 30-34.  
Li Jinchuan, Bai Zhongke, Chai Shujie, et al. Study on technology of land reclamation and ecological rehabilitation of waste land in Pingshuo surface mine[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(17): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姚致远. 旱地豆科绿肥提升土壤碳氮储量及降低环境代价的潜力与机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.  
Yao Zhiyuan. Potential and Mechanisms of Dryland Leguminous Green Manure for Improving Soil Carbon/Nitrogen Stocks and Reducing Environmental Costs[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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): 184-196.  
He Bing, Li Tingliang, Li Li, et al. Response of carbon and nitrogen distribution of reclaimed soil aggregates to fertilizers in coal mining subsidence area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 184-196. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.  
Liang Libao, Feng Pengyan, Xu Jianmin. Efficacy of fertilization in improving soil aggregation, carbon and nitrogen in soil reclaimed from subsided areas caused by coal mining[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 45-51. (in Chinese with English abstract)
- [17] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 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): 1129-1138.  
Di Jiaying, Liu Xiaofen, Du Zhangliu, et al. Influences of long-term organic and chemical fertilization on soil aggregation and associated organic carbon fractions in a red paddy soil[J]. *Journal of Chinese Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1129-1138. (in Chinese with English abstract)
- [20] Sodhi G P S, 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] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2416-2424.  
Wang Xing, Zhong Zekun, Zhang Xinyi, et al. Relational between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration[J]. *Environmental Science*, 2019, 2020, 41(5): 2416-2424. (in Chinese with English abstract)
- [22] 苑亚茹, 邹文秀, 郝翔翔, 等. 黑土团聚体结合碳对不同有机肥施用量的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3235-3242.  
Wan Yaru, Zou Wenxiu, Hao Xiangxiang, et al. Response of aggregate-associated carbon in mollisols to application rate of organic manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3235-3242. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kool D M, Chung H, Tata K R, et al. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO<sub>2</sub> spring[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282-1293.
- [24] Li H, Han X, Wang F, et al. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(13-14): 1673-1690.
- [25] Chen Y, Zhang X, He H, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1018-1026.
- [26] Amelung W, Zech W, Zhang X, et al. Carbon, nitrogen and sulfur pools in particle size fractions as influenced by climate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1): 172-181.
- [27] 林诚, 郑祥洲, 郭宝玲, 等. 亚热带地区不同种植年限果园土壤团聚体结构及有机碳、氮分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7): 1560-1566.  
Lin Cheng, Zheng Xiangzhou, Guo Baoling, et al. Characteristics of soil aggregate structure and organic carbon nitrogen distribution in orchards of different planting age in subtropical areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1560-1566. (in Chinese with English abstract)
- [28] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [29] 邵兴芳. 长期有机培肥模式下黑土团聚体碳氮积累及矿化特征[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.  
Shao Xingfang. Carbon and Nitrogen Accumulation and Mineralization in Aggregates under Long-term Manure Fertilization Practices on Black Soil[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨洪波, 申艳, 徐明岗, 等. 长期施肥下黑土不同团聚体氮组分的植物有效性差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1581-1587.  
Yang Hongbo, Shen Yan, Xu Minggang, et al. Difference in plant availability of nitrogen in aggregates of black soil under long-term fertilization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(6): 1581-1587. (in Chinese with English abstract)
- [31] Craswell E T, Saffigna P G, Waring S A. The mineralization of organic nitrogen in dry soil aggregates of different sizes[J]. *Plant and Soil*, 1970, 33(1-3): 383-392.
- [32] Pan G, Zhou P, Li Z, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3-4): 274-280.
- [33] Li Z, Liu M, Wu X, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil



- organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 268-274.
- [34] Xie J, Peng B, Wang R, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an anthrosol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 555-567.
- [35] Lal R. Beyond copenhagen: Mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration[J]. *Food Security*, 2010, 2(2): 169-177.
- [36] Wang R, Zhou J, Xie J, et al. Carbon sequestration in irrigated and rain-fed cropping systems under long-term fertilization regimes[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, DOI. org /10. 1007/s42729-020-00181-6.

## Effects of fertilization regimes on carbon and nitrogen contents of aggregates and maize yield in reclaimed soils

Cao Hanbing<sup>1</sup>, Xie Junyu<sup>1,2</sup>, QiangJiu Ciren<sup>3</sup>, Guo Lu<sup>4</sup>, Hong Jianping<sup>1</sup>, Jing Yaodong<sup>1</sup>, Meng Huisheng<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030031, China; 3. Agriculture and Animal Husbandry Bureau in Shannan Cona County, Shannan 856700, China; 4. Binzhou Academy of Animal Science and Veterinary Medicine of Shandong Province, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the distribution characteristics of organic carbon (OC) and total nitrogen (TN) in water-stable aggregates, silt and clay fractions, in order to gain a deep understanding the sequestration mechanism of soil organic carbon (SOC) under various fertilization regimes. Topsoil samples (0-20 cm) were collected from the raw soil and reclaimed soil under different fertilization regimes of six consecutive ages. A wet sieving method was used to fractionate the particle size in soil, including the large macroaggregates (> 2 mm), small macroaggregates (0.25-2 mm), microaggregates (0.053-0.25 mm), as well as the silt- and clay-sized fractions (< 0.053 mm). The contents of OC and TN were analyzed for the water-stable aggregates, the silt and clay fractions. A systematic experiment was also carried out to reveal the driving factors for the changes of SOC storage, while, the relationship between crop yields and the OC content in the water-stable aggregates, the silt and clay fractions. Four treatments were selected, including no fertilizer (control, CK), nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer (NPK), single application of organic manure (M), and the combined application of organic manure and synthetic fertilizers (MNPK). The results showed that the contents of OC and TN were similar in macroaggregates and microaggregates, particularly higher than that in the silt and clay fractions. Compared with the raw soil, the CK, NPK and M treatments significantly increased the OC contents in the 0.25-2 mm, 0.053-0.25 mm aggregates, and the < 0.053 mm fractions, with the increase of 97.96%, 66.19% and 97.60% (CK), 87.07%, 92.09%, 92.80% (NPK), and 95.24%, 148.20%, 112.00% (M), respectively. The MNPK treatment significantly increased the OC contents in > 2, 0.25-2, 0.053-0.35 mm aggregates, and the < 0.053 mm fractions, with the increase of 151.88%, 160.54%, 135.25%, and 92.80%, respectively. In addition, the CK, NPK, M and MNPK treatments significantly increased the TN contents in > 2 mm, 0.25-2 mm and 0.053-0.25 mm aggregates, with the increase of 43.66%, 46.78%, and 29.95% (CK), 41.83%, 52.35%, 30.43% (NPK), 52.81%, 50.43%, 44.93% (M), and 63.80%, 62.96%, 39.61% (MNPK), respectively. The enrichment factors of organic carbon ( $E_C$ ) and total nitrogen ( $E_N$ ) were similar in the macroaggregates and microaggregates, generally higher than those in silt and clay fractions. Both the M and MNPK treatments significantly increased the C/N ratios of water-stable aggregates, and the silt and clay fractions (except for > 2 mm aggregates). The OC sequestered in the > 2 mm aggregates was driven by the proportions of > 2 mm, whereas, the OC sequestered in the other water-stable aggregates, and the silt and clay fractions was driven by the OC contents. The crop yields increased linearly as the increase of OC contents in the water-stable aggregates, and the silt and clay fractions, indicating that the SOC pool in this area has not saturated, especially for the < 0.053 mm fraction. Therefore, the application of organic manure combined with NPK (MNPK) to the reclaimed soil with low fertility can be an effective way to improve soil performance in coal mining subsidence areas.

**Keywords:** reclamation; soils; water-stable aggregates; organic carbon; total nitrogen; crop yield