

# 有机培肥显著提升矿区复垦土壤活性有机碳含量

安永齐<sup>1,2</sup>, 王小利<sup>1\*</sup>, 靳东升<sup>3</sup>, 郜春花<sup>3</sup>, 张强<sup>3</sup>, 洪坚平<sup>4</sup>, 徐明岗<sup>2\*</sup>

(1 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西太原 030031;

4 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801)

**摘要:**【目的】土壤有机碳作为土壤肥力的核心, 其不同组分间具有高度异质性。研究不同施肥措施对煤矿区复垦土壤有机碳及其各组分提升的差异特征, 可为煤矿区土壤修复提供理论依据。【方法】田间试验在山西煤矿复垦区进行, 复垦始于 2014 年, 种植作物为大豆(1 年)和玉米(2 年)轮作, 采样时(2018 年)种植作物为玉米。试验共设 5 个处理分别为未复垦自然恢复(ZH)、不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、单施有机肥(M)和有机肥配施化肥(MNPK)。使用物理-化学联合分组方法, 将土壤有机碳分为游离活性、物理保护、化学保护和生物化学保护 4 个组分, 分析了不同施肥处理下土壤各组分有机碳的含量, 计算了各组分有机碳与总有机碳含量间的相关关系。【结果】相较于自然恢复处理, CK、NPK、M、MNPK 处理中土壤总有机碳含量分别提高了 11.8%、24.0%、49.3% 和 38.8%, 有机肥处理又显著高于 CK 和 NPK 处理。M、MNPK 处理下, 游离活性有机碳含量分别为 2.11 和 1.68 g/kg, 物理保护有机碳含量分别为 0.70 和 0.49 g/kg, 均显著高于 CK 和 NPK 处理; 化学保护和生物化学保护组分的有机碳含量在各处理间差异不显著。除了微团聚体内的轻组和粘、粉粒外, 各组分质量比例在不同施肥处理间均存在显著差异, 施用有机肥主要增加了大团聚体(游离活性态和物理保护态)的质量比例, 改善了土壤结构。相关分析表明, 游离态的粗颗粒和细颗粒有机碳及物理保护有机碳与总有机碳含量间呈现极显著正相关关系( $P < 0.01$ ), 其中拟合方程的斜率表示组分碳含量随单位总有机碳含量增加而引起的变化值, 最高的为游离粗颗粒有机碳组分, 达到 39.7%, 游离细颗粒和物理保护有机碳组分的变化率分别为 18.6% 和 21.7%; 而化学保护粘、粉粒和生物化学保护粘粒组有机碳与总有机碳含量无显著相关性。【结论】施肥和轮作与自然恢复状态相比, 短期可显著提高土壤有机碳含量, 施用有机肥效果好于单施化肥。单施或者与 NPK 配合施有机肥主要促进了土壤大团聚体中游离活性态和物理保护态有机碳含量的提升, 单施有机肥效果更佳。由于新增的土壤有机碳活性高, 需要长时间持续投入才可能恢复土壤有机碳的稳定性。

**关键词:** 煤矿区复垦土壤; 土壤有机碳; 物理-化学联合分组; 有机碳组分; 土壤碳固定

## Manure fertilization significantly increases the content of active organic carbon in reclaimed mine soil

AN Yong-qi<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-li<sup>1\*</sup>, JIN Dong-shen<sup>3</sup>, GAO Chun-hua<sup>3</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup>, HONG Jian-ping<sup>4</sup>, XU Ming-gang<sup>2\*</sup>

[ 1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS)/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3 Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 4 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China ]

**Abstract:** 【Objectives】 Soil organic carbon is the core of soil fertility, the fractions of organic carbon are highly heterogeneous. We studied the promotion effect of fertilization on different organic carbon fractions to provide theoretical basis for efficient remediation of coal mining soil. 【Methods】 A field experiment was conducted in the coal mining reclamation soil in Shanxi Province since 2014. The planting system was rotation

收稿日期: 2019-12-26 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1710255); 国家自然科学基金项目(31860160)。

联系方式: 安永齐 E-mail: 15519883919@163.com

\* 通信作者 王小利 E-mail: ls.wangxl@gzu.edu.cn; 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn

of one-year-soybean with two-year-maize. Five fertilization treatments included natural recovery (ZH), no fertilization (CK), chemical fertilizer (NPK), organic manure (M), manure combined with chemical fertilizer (MNPK). In the 2018 maize season, 0–20 cm top soil samples were collected. Using the physical-chemical fractionation methods, the soil organic carbon were classified into four fractions: unprotected fractions, physical protective fractions, chemical protective fractions and biochemical protective fractions. The saturation trend of soil organic carbon by analyzing the correlation between the fractions carbon and the total organic carbon content. **【 Results 】** Compared with natural reclamation, rotation significantly increased the soil total organic carbon content ( $P < 0.05$ ). Soil total organic carbon increased by 11.8%, 24.0%, 38.8% and 49.3% respectively in CK, NPK, M and MNPK treatments, and M and MNPK treatments were significantly higher than in CK and NPK treatments. Of the total organic C in M and MNPK treatments, the unprotected organic C were 2.11 g/kg and 1.68 g/kg and the physically protected organic C were 0.70 g/kg and 0.49 g/kg, respectively, which were significantly higher than in CK and NPK treatments; while the chemically protected organic C and biochemical protection organic C content were not significantly different among the four treatments. The quality ratios of each fraction in M and MNPK treatments were not significantly different with the CK and NPK treatments in the light fraction, silt and clay in the micro-aggregate, but significantly in the large aggregates (unprotected and physically-protected). The organic C in unprotected coarse and fine particles and the physically protected organic C were all significantly and positively correlated with the total organic C content ( $P < 0.01$ ). According to the slope of the fitted equation, with the increase of total organic C per unit, the highest increase rate in the four fractions was the unprotected coarse particle organic C (39.7%), then were the unprotected fine particulate organic C (18.6%) and physically protected organic C (21.7%), respectively. The relationship between the silt and clay of chemical protection fractions C and the clay of biochemical protection fractions C were not significant with the total organic C. **【 Conclusions 】** Fertilization and crop rotation are more effective than natural recovery in rapid increase of soil organic carbon contents, manure are more effective than pure NPK fertilization. Single and combined application of manure with NPK could increase the coarse aggregates contents, i.e. increase the friable unprotected coarse and fine particle C and physically protected C, and single manure application performs better than with NPK together. However, as the newly increased soil carbon are quite active, so long-term organic manure input is necessary for the recovery of soil function in coal mine reclamation.

**Key words:** coal mining reclamation soil; soil organic carbon; physical-chemical fractionation; organic carbon fractions; soil carbon sequestration

山西省大面积的采煤导致土地尤其是耕地遭到破坏<sup>[1]</sup>, 而工程修复会扰动土壤, 导致土壤基础肥力尤其是有机碳含量下降<sup>[2]</sup>。土壤有机碳是土壤碳库的重要组成部分, 是评价受人为管理措施影响的农业可持续发展的重要指标<sup>[3-4]</sup>。且土壤中有有机碳各组分间存在高度异质性, 不同组分对土壤有机碳的累积和稳定发挥着其相应的作用<sup>[5]</sup>。深入研究复垦后不同施肥对土壤有机碳及其各组分的影响, 能更好地了解复垦区土壤有机碳的固存特征, 对矿区土壤修复具有重要意义。目前, 已有关于不同施肥条件下土壤有机碳及其组分变化的大量研究。李建华等<sup>[6]</sup>和何冰等<sup>[7]</sup>关于煤矿区复垦农田团聚体的研究表明, 各粒级团聚体质量比例中以粒径  $< 0.25$  mm 团聚体占优

势, 但随着有机肥的施入, 新增加的有机碳主要富集在粒径  $> 0.25$  mm 的大团聚体中。陆太伟等<sup>[8]</sup>利用 Meta-Analysis 整合数据发现, 大团聚体 (粒径  $> 0.25$  mm) 中有机碳累积量随着化肥的施入显著增加, 微团聚体 (粒径  $< 0.053$  mm) 中有机碳由于团聚体的物理保护作用维持在稳定水平。Xu 等<sup>[9]</sup>的研究同样表明, 在秸秆还田条件下土壤新增的有机碳主要集中在颗粒有机碳 (粒径  $> 0.053$  mm) 中。而 Tong 等<sup>[10]</sup>研究发现, 在红壤长期施肥条件下施肥可以提高各组分有机碳含量, 且矿物结合态有机碳 (粒径  $< 0.053$  mm) 中固定的新有机碳量最多。Hassink<sup>[11]</sup>研究也提出, 新的有机质进入土壤首先与粘粉粒和微团聚体 (粒径  $< 0.25$  mm) 结合, 当粘粉粒和微团聚体组分中

结合的有机质含量达到或接近饱和后, 有机质才在大团聚体 (粒径 > 0.25 mm) 中形成。苑亚茹等<sup>[12]</sup>和邓文悦等<sup>[13]</sup>的研究则表明, 施肥虽然增加了大团聚体中的有机碳含量, 但减少了粘粉粒中的有机碳含量。

虽然已经有很多在不同施肥下农田有机碳组分特征的研究, 但关于煤矿复垦区土壤中不同保护机制下的有机碳含量在恢复过程中的变化特征还不明确。而利用 Stewart 等<sup>[14-15]</sup>基于 Six 等<sup>[16]</sup>提出的物理分组方法改进而得到的最新物理-化学联合分组方法, 能更加系统地研究游离活性、物理保护、化学保护和生物化学保护这 4 个有机碳组分, 有助于更好地了解复垦土壤中不同组分有机碳在不同施肥措施下的变化特征。因此, 本研究以山西太原古交的定位试验为基础, 采用物理-化学联合分组方法, 研究复垦土壤中不同施肥处理对土壤有机碳组分提升的差异, 并探讨各组分有机碳与总有机碳含量之间的相关性, 为煤矿复垦区的土壤修复和合理施肥措施的选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于山西省太原市古交屯兰工矿复垦区 (东经 112°06′、北纬 37°53′), 该区年平均气温 9.5℃, 平均降水量 460 mm, 为温带大陆性季风气候。2002 年山西煤电集团屯兰矿开始排煤矸石于天然沟壑内, 2013 年排矸活动结束后, 在矸石山填埋区表面进行覆土, 土源来自于周围自然土壤, 初次覆土平均厚度为 50 cm, 经一年自然恢复后, 于

2014 年布置试验, 2018 年为复垦第 5 年。试验开始时耕层 (0—20 cm) 土壤基本性质见表 1, 其中有机碳含量是 2.76~3.46 g/kg, 虽然数值波动较大, 但因为复垦土壤养分含量贫瘠且存在空间异质性, 各处理间的差异不显著。

### 1.2 试验设计

本试验包括 5 个处理: 1) 未复垦自然恢复 (ZH); 2) 不施肥 (CK); 3) 单施化肥 (NPK); 4) 单施有机肥 (M); 5) 有机肥配施化肥 (MNPK)。根据复垦试验区地势不同布置小区, 面积分别为 230~1120 m<sup>2</sup> 不等, 每个处理 3 次重复。种植作物为大豆 (1 年) 和玉米 (2 年) 轮作, 采样时 (2018 年) 种植作物为玉米。ZH 处理为覆土后没有经过复垦的撂荒地, CK 处理不施肥, 其他处理按照等氮量 150 kg/hm<sup>2</sup> 施肥, 无机肥为复合肥, 其中 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 18:12:10, 有机肥使用平遥国青 (由平遥县国青同盈禽业有限公司生产, 有机质含量 53.5%, 氮含量 2.2%, 磷含量 1.68%, 钾含量 2.2%), MNPK 处理施肥量为 1/2 M 配施 1/2 NPK, 所施肥料全部作为基肥在春播前施入。

### 1.3 土壤有机碳各组分的测定

2018 年 10 月份玉米收获后, 采集表层 (0—20 cm) 新鲜土样。考虑到复垦地的空间异质性和每个小区面积较大的问题, 在每个小区加大采样点, 方格法采取 10 个样点, 混匀后装袋运回实验室, 风干后过 2 mm 筛备用。

土壤有机碳分组的方法采用改进的 Stewart 等<sup>[14-15]</sup>的最新物理-化学联合分组方法。具体实验步骤如

表 1 试验开始时表层土壤的基本性质 (2014 年)

Table 1 Basic properties of surface soil at the beginning of the experiment in 2014

施肥处理 Treatment	处理代码 Treatment code	有机碳 (g/kg) Organic C	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	pH
未复垦自然恢复 Naturally recovering soil	ZH	3.04 a	12.69 a	10.33 a	78.43 a	8.64 a
轮作, 不施肥 Rotation, no fertilization	CK	3.03 a	14.06 a	8.90 a	84.90 a	8.62 a
轮作, 单施化肥 Rotation, chemical NPK	NPK	2.76 a	14.63 a	9.81 a	83.02 a	8.58 a
轮作, 单施有机肥 Rotation, single manure	M	3.46 a	8.58 b	7.33 a	75.35 a	8.57 a
轮作, 有机肥配施化肥 Rotation, manure plus NPK	MNPK	2.95 a	12.69 a	9.58 a	83.71 a	8.67 a

注 (Note): 同列数字后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters are significant difference at 5% level among the treatments.

下:称取 20.00 g 风干土样放于 0.25 mm 筛中,下层套上 0.053 mm 筛,分别放入 15 个玻璃珠,以 30 次/min 的速率震荡 20 min,筛上分别得到粗颗粒有机碳组分 (cPOC) 和微团聚体组分 ( $\mu$ agg),将粒径 < 0.053 mm 的部分用离心法于 900 和 3300 r/min (加入  $\text{CaCl}_2$  作为絮凝剂) 下离心 7 和 15 min,分别得到游离态的粉粒组分 (d-Silt) 和粘粒组分 (d-Clay)。

将之前得到的微团聚体组分进行密度浮选,加入 50 mL  $\text{NaI}$  ( $1.70 \text{ g/cm}^3$ ) 溶液在 4000 r/min 下离心 20 min,抽滤后未通过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜的是轻组部分 (light fraction, LF),即未保护细颗粒有机碳组分 (fPOC),剩余重组部分加入 50 mL 六偏磷酸钠溶液 ( $5 \text{ g/L}$ ),以 180 r/min 的速率震荡 18 h 后过 0.053 mm 筛,留在筛上的为物理保护有机碳组分 (iPOC),过筛的部分同样使用离心法分离出闭蓄态粉粒组分 ( $\mu$ -Silt) 和闭蓄态粘粒组分 ( $\mu$ -Clay)。

将前两步得到的粉粒和粘粒组分加入 25 mL 6 mol/L 的  $\text{HCl}$  溶液,于  $95^\circ\text{C}$  条件下回流 16 h,结束后抽滤,留在滤膜上的部分为非酸解组分 (NH-dSilt、NH-dClay、NH- $\mu$ Silt、NH- $\mu$ Clay),酸解组分 (H-dSilt、H-dClay、H- $\mu$ Silt、H- $\mu$ Clay) 为全组分和非酸解组分之差。

将各组分加入 1 mol/L 的  $\text{HCl}$  (土液比 1:2.5) 以排除土样中的无机碳,后用元素分析仪 (瑞典利曼公司, EA3000) 测定各组分有机碳含量。根据此方法,土壤有机碳被分为游离活性有机碳组分 (cPOC、fPOC)、物理保护有机碳组分 (iPOC)、化学保护有机碳组分 (H-dSilt、H-dClay、H- $\mu$ Silt、H- $\mu$ Clay) 和生物化学保护有机碳组分 (NH-dSilt、NH-dClay、NH- $\mu$ Silt、NH- $\mu$ Clay) 4 个有机碳组分。

#### 1.4 数据处理

所有土壤测定结果均以 3 次测定结果的平均值表示。采用 SPSS 17.0, SigmaPlot 14.0, Excel 2016 等软件进行数据处理、分析与绘图。不同处理间的差异采用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理下复垦土壤总有机碳变化差异

复垦区经过 5 年培肥后,相较于未复垦自然恢复 (ZH),各处理下的土壤有机碳都得到了显著提升 ( $P < 0.05$ ) (图 1),5 年平均提高 31.0%,尤其是添加有机肥的 M、MNPK 处理的有机碳含量分别提高到

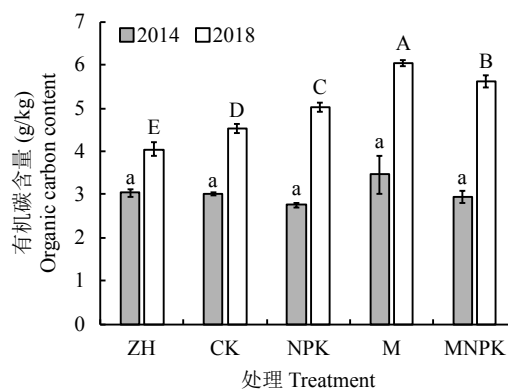


图 1 2014、2018 年不同施肥处理复垦土壤总有机碳含量  
Fig. 1 Total soil organic carbon content in reclaimed land under different fertilization treatments in 2014 and 2018

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年份处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 5% level in the same year.]

了 6.05 和 5.62 g/kg, 分别比 ZH 处理提高了 49.3% 和 38.8%。其中 M 处理效果最佳, 分别是 CK、NPK、MNPK 的 1.34、1.20 和 1.08 倍。NPK 和 CK 处理分别比 ZH 提高了 24.0% 和 11.8%。和试验开始 (2014) 时相比, 所有处理的土壤有机碳都得到了显著恢复 (图 1) ( $P < 0.05$ ), 提升幅度分别为 ZH (33.3%)、CK (49.5%)、NPK (82.0%)、M (74.8%) 和 MNPK (90.6%)。

### 2.2 不同施肥处理下复垦土壤有机碳各组分质量分布

试验土壤经分组后平均回收率为 101.3%, 说明分组方法准确可靠。表 2 显示, 各处理中质量占比较大的组分为游离态粉粒、细自由颗粒和微团聚体内粉粒, 平均占比分别达到 54.9%、15.7% 和 13.3%, 而质量占比最低的组分是轻组 (0.2%~0.5%)。相较于 ZH 处理, M 处理显著提高了粗颗粒组分质量比例 (83.2%); NPK、M 和 MNPK 处理均显著提高了细自由颗粒组分质量占比, 分别提高了 2.1、1.6 和 1.83 倍; M 和 MNPK 显著减少了游离态粉粒组分质量, 减少幅度为 21.1% 和 15.9%。而其余各组分的质量比例在各施肥处理之间无显著性差异。

### 2.3 不同施肥处理下复垦土壤有机碳各组分含量特征

不同处理下复垦土壤各组分有机碳含量存在差异 (表 3)。对于游离活性有机碳组分, M 和 MNPK 处理相较于 ZH、CK 和 NPK 处理均显著增加了粗颗粒 (cPOC) 的有机碳含量, 分别提高了 108.6%~

表 2 不同施肥处理下土壤粒径团聚体及微团聚体内各组分有机碳的质量分数 (%)

Table 2 Mass percentages of organic carbon in different aggregates and the fractions of microaggregates of soils under different fertilization treatments

处理 Treatment	粗颗粒 cPOM (> 250 μm)	微团聚体 (53~250 μm)					游离态粉粒 d-Silt (2~53 μm)	游离态粘粒 d-Clay (< 2 μm)
		总量 Total	轻组 Light fraction	细自由颗粒 iPOM	粉粒 μ-Silt	粘粒 μ-Clay		
ZH	7.6 ± 1.5 bc	26.7 ± 2.9 b	0.3 ± 0.1 a	10.1 ± 0.8 d	14.3 ± 1.8 a	4.1 ± 0.4 a	61.7 ± 2.8 a	1.9 ± 0.1 a
CK	11.0 ± 1.5 ab	28.2 ± 3.3 b	0.3 ± 0.1 a	12.9 ± 1.8 cd	12.7 ± 1.6 a	3.8 ± 0.2 a	57.1 ± 4.0 ab	2.0 ± 1.1 a
NPK	6.1 ± 1.0 c	36.2 ± 0.5 a	0.2 ± 0.1 a	20.7 ± 1.2 a	12.8 ± 1.4 a	3.8 ± 0.1 a	55.2 ± 0.8 abc	1.5 ± 0.2 b
M	13.9 ± 0.3 a	33.0 ± 1.7 ab	0.3 ± 0.1 a	16.4 ± 0.5 bc	13.3 ± 1.2 a	3.8 ± 0.2 a	48.7 ± 1.2 bc	1.6 ± 0.1 ab
MNPK	10.1 ± 1.3 abc	35.1 ± 1.1 a	0.5 ± 0.1 a	18.4 ± 1.5 ab	13.4 ± 1.0 a	3.8 ± 0.3 a	51.9 ± 1.1 bc	2.0 ± 0.2 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments at the 5% level .

表 3 不同施肥处理下各组分有机碳含量 (g/kg)

Table 3 Content of different organic carbon fraction in soil under different fertilization treatments

处理 Treatment	游离活性态 Unprotected		物理保护态 Physically-protected iPOC	化学保护态 Chemically-protected		生物化学保护态 Biochemically-protected	
	粗颗粒 cPOC	细颗粒 fPOC		粉粒组 H-Silt	粘粒组 H-Clay	粉粒组 NH-Silt	粘粒组 NH-Clay
	ZH	0.61 ± 0.02 c	0.23 ± 0.03 c	0.25 ± 0.05 c	0.68 ± 0.02 b	0.45 ± 0.03 a	1.64 ± 0.05 b
CK	0.66 ± 0.02 c	0.39 ± 0.04 bc	0.24 ± 0.03 c	0.72 ± 0.01 ab	0.49 ± 0.09 a	1.82 ± 0.03 ab	0.21 ± 0.02 ab
NPK	0.70 ± 0.04 c	0.21 ± 0.03 c	0.67 ± 0.03 a	0.87 ± 0.04 a	0.40 ± 0.01 a	2.02 ± 0.05 a	0.15 ± 0.02 c
M	1.46 ± 0.13 a	0.65 ± 0.10 a	0.70 ± 0.05 a	0.74 ± 0.06 ab	0.40 ± 0.02 a	1.87 ± 0.13 ab	0.24 ± 0.02 a
MNPK	1.14 ± 0.11 b	0.54 ± 0.05 ab	0.49 ± 0.02 b	0.86 ± 0.11 a	0.43 ± 0.02 a	1.90 ± 0.13 ab	0.25 ± 0.02 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments at the 5% level .

139.3% 和 62.9%~86.9%。对于细颗粒组分 (fPOC), M 和 MNPK 处理相较于 ZH 和 NPK 处理, 平均分别提高了 2.97 和 2.46 倍。NPK 处理相较 ZH 和 CK 处理均未显著提升组分有机碳含量。

物理保护有机碳组分中, 与 ZH 和 CK 处理相比, 各施肥处理都显著提升了有机碳含量, 提升幅度达到 1.96~2.80 和 2.04~2.92 倍, 而 CK 和 ZH 处理的组分有机碳含量间差异不显著。

对于化学保护有机碳组分, NPK 和 MNPK 处理比 ZH 处理显著提升了其中粉粒组 (H-Silt) 的碳含量, 分别达到了 0.87 和 0.86 g/kg, 分别增加了 27.9% 和 26.5%, 而其余处理间差异不显著。粘粒组 (H-Clay) 中各处理间的有机碳含量无显著差异。

在生物化学保护有机碳中, NPK 处理显著提升了粉粒组 (NH-Silt) 的有机碳含量, 达到了 ZH 处理的 1.23 倍。M 和 MNPK 处理较 ZH 处理显著提升了

粘粒组 (NH-Clay) 的有机碳含量, 增幅分别为 33.3% 和 38.9%, 其余各处理相与 ZH 处理差异不显著。

由各组分有机碳含量占总有机碳比例 (图 2) 可见, 占总有机碳比例最大的组分为生物化学保护有机碳, 比例为 34.9%~45.2%; 其次为游离活性有机碳和化学保护有机碳, 平均比例分别为 25.4% 和 24.4%; 最少的为物理保护有机碳, 只占 5.4%~13.4%。在不同处理间, 施用有机肥 (M、MNPK) 处理显著提高了游离活性有机碳组分的比例, 且显著降低了生物化学有机碳组分的比例。与 ZH、CK 处理相比, NPK 处理显著提高了物理保护组分的有机碳含量, 其余组分间差异不显著。

## 2.4 土壤各组分有机碳和总有机碳含量的关系

相关分析 (图 3-a、b) 表明, 复垦农田土壤中游离活性有机碳、物理保护有机碳与总有机碳含量的

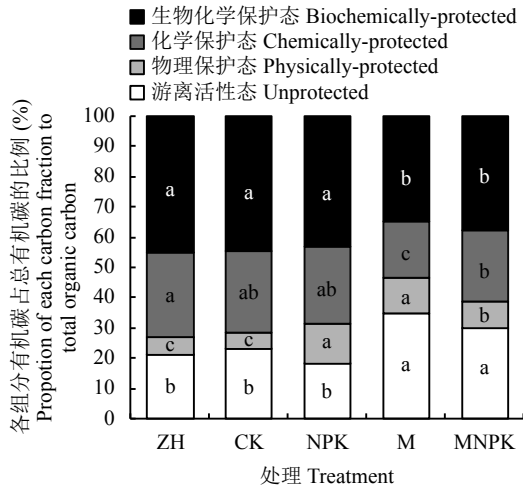


图 2 不同施肥处理下土壤各组分有机碳占总有机碳的比例

Fig. 2 Proportion of each organic carbon fraction to the total organic carbon under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱中不同字母表示各组分在不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters with the values in the bars indicate that the fractions are significantly different among treatments at the 5% level.]

关系呈现极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )。相关方程的斜率表示随总有机碳变化的组分碳变化量, 由图中可知, 总有机碳含量每提升一个单位 (g/kg), 游离活

性有机碳中的粗颗粒 (cPOC) 和细颗粒 (fPOC) 以及物理保护有机碳 (iPOC) 的变化率分别为 39.7%、18.6% 和 21.7%。生物化学保护有机碳中的粉粒组 (NH-Silt) 与总有机碳含量呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 变化率为 11.9%。而化学保护有机碳 (H-Silt 和 H-Clay) 和生物化学保护有机碳的粘粒组 (NH-Clay) 与总有机碳含量相关均不显著 (图 3-c、d)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥下土壤有机碳含量

试验于煤矿复垦区进行, 采用的覆土土源为周围自然土壤, 且在覆土过程中为了平整土地而进行的机械扰动破坏了土壤组成, 导致修复后的土壤基础肥力尤其是有机碳含量显著降低<sup>[2, 17]</sup>。本试验表明, 各处理相较于未复垦自然恢复 (ZH) 都能显著提高土壤有机碳含量, 其中有机肥配施化肥 (MNPK) 的提升效果最显著, 这与其他研究者的结果<sup>[6, 18]</sup>相似。其主要原因: 一方面在于施肥能增加作物产量, 何浩等<sup>[9]</sup>研究表明, 有机无机肥配施平均比单施化肥和不施肥增产 14.9% 和 83.5%, 促进了根系的生长, 进而

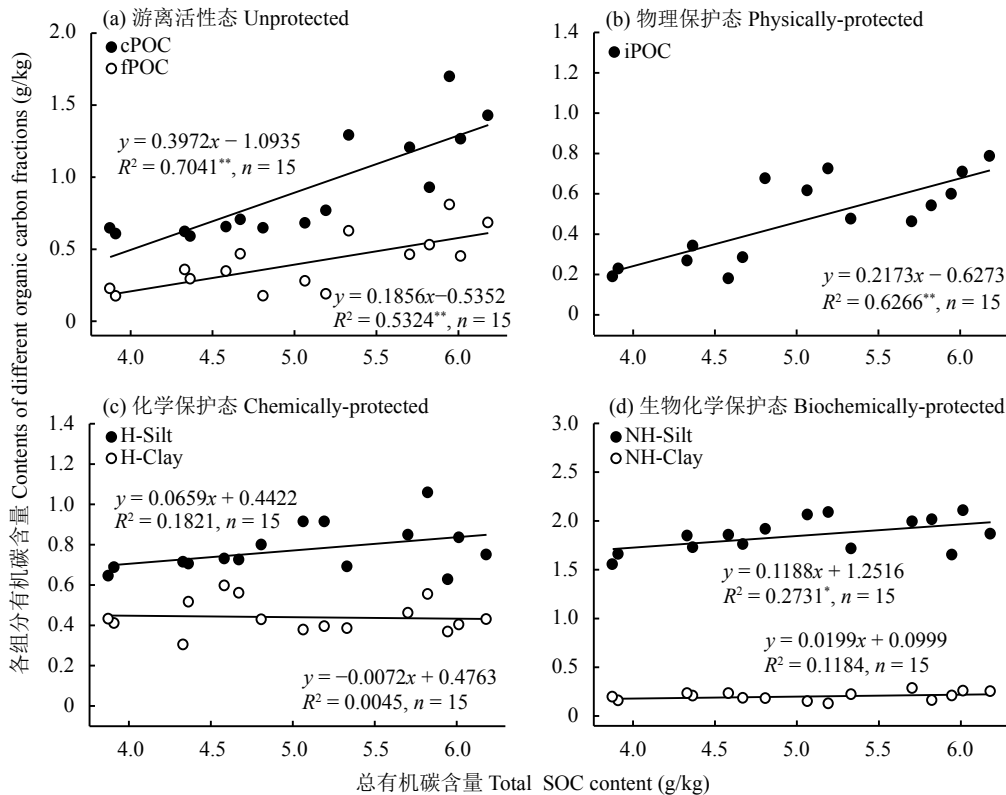


图 3 不同施肥下总有机碳含量与各组分有机碳含量的相关关系

Fig. 3 Correlations between the contents of total soil organic carbon (SOC) and different organic carbon fractions under different fertilization treatments

增加了作物残茬量, 改善了土壤酶和微生物的活性, 从而增加了土壤有机碳的含量<sup>[20]</sup>; 另一方面有机肥的施入则直接增加了碳投入量, 因此增加了土壤有机碳含量<sup>[21-22]</sup>。

### 3.2 不同施肥下土壤不同有机碳组分含量

在对土壤有机碳不同组分的研究中, 由于不同大小团聚体的表面化学性质不同, 使其结合的有机碳在数量、组成和固持能力上存在高度异质性<sup>[5, 23-24]</sup>, 所以不同碳组分对施肥响应的敏感性也不同。本研究中有肥的施入显著增加了游离活性组分内粗颗粒 (cPOC) 和细颗粒 (fPOC) 的有机碳含量, 且游离活性组分平均占总有机碳含量的比例为 25.4%, 王朔林等<sup>[25]</sup>研究发现, 长期施肥下该组分占栗褐土总有机碳的 8.7%~21.5%, 与本试验结果相似。根据 Six 等<sup>[16]</sup>提出的碳饱和模型, 游离活性组分有机碳主要来自于植物的残渣, 被认为几乎不受土壤团聚体的保护, 对不同施肥措施响应敏感, 能够作为一种有机碳变化的良好指示组分<sup>[26]</sup>。本研究中游离活性组分随着总有机碳含量的提升表现出极显著的增加趋势, 说明复垦后土壤中新增的有机碳主要富集在游离活性有机碳中, 尤其是其中的粗颗粒为新碳的主要固存组分。

本研究中物理保护有机碳占总有机碳的 5.4%~13.4%, 与刘骅等<sup>[27]</sup>报道的灰漠土中物理保护碳组分所占比例为 9.6%~15.6% 的结果相近。施肥处理 (NPK、M、MNPK) 显著增加了物理保护组分 (iPOC) 的有机碳含量, 且与总有机碳含量间呈极显著正相关关系, 说明物理保护有机碳同样是复垦土壤有机碳的主要固存组分。土壤有机碳的物理保护, 是指由于土壤团聚体的包裹而隔离了微生物和酶的活动, 进而限制有机碳的分解, 起到固定有机碳的作用<sup>[21, 28]</sup>。施肥能够显著影响物理保护组分, 其原因可能在于肥料的施入对土壤中微生物的活性和作物根的生长及其分泌物的增加起到了促进作用, 使得新增的有机碳进入物理保护有机碳组分中, 增强了土壤团聚体的稳定性, 进而增强了土壤的物理保护作用<sup>[13, 21, 28-29]</sup>。本试验在施肥处理下, 同时显著提高了物理保护组分的质量占比和其中的有机碳含量, 也说明了施肥能通过改善复垦区土壤的团聚体结构, 从而增加土壤的物理保护组分有机碳含量。

本研究中, 化学保护组分和生物化学保护组分一起平均占到了总有机碳含量的 65.6%, 是目前复垦土壤中有机碳的主要储存组分。它们是土壤中粘粉粒与有机物分解最终产物相结合的部分, 具有较强的稳定性<sup>[21]</sup>。其中化学保护指由粘土矿物通过配位体

置换、络合作用等导致的有机碳固存; 生物化学保护指有机碳自身抗降解性形成稳定的难降解物质 (如芳香环结构的木质素、烷基结构的碳等)<sup>[30-31]</sup>。本研究中化学保护的粉粒组 (H-Silt) 有机碳含量在 MNPK 处理下显著提高, 且与总有机碳间呈现出显著正相关关系 (变化率为 11.9%), 其原因可能是施用有机肥为微生物提供了直接的养分来源, 增加了微生物的分泌物, 且直接作用于粉粒, 从而促进了土壤中稳定碳组分的累积<sup>[10, 32-33]</sup>; 同时粉粒中存在部分活性有机质的中间代谢产物, 因此粉粒组对土壤有机碳的转移和固定起着重要的作用<sup>[34]</sup>。本研究中化学保护粘粒组 (H-Clay) 和生物化学保护粘粒组 (NH-Clay) 与总有机碳间均相关性不显著, 生物化学保护粉粒组虽与总有机碳表现出显著正相关关系, 但在各施肥处理间差并不显著。因为这些组分的有机碳都属于矿物结合有机碳, 主要是由腐殖质组成<sup>[35]</sup>, 而经留茬和有机肥等途径输入的外源有机碳在分解后会首先向游离活性有机碳和物理保护有机碳转化, 最后才能成为腐殖化程度较高的矿物结合有机碳, 相对稳定地固存于土壤中<sup>[27-28, 34]</sup>。本试验的布置时间只有 5 年, 所以目前短时间内分解形成的腐殖质可能还不足以显著增加复垦区土壤的稳定态组分有机碳含量。

综上, 对于本研究中的复垦土壤, 在当前条件下, 除了化学保护有机碳组分和生物化学保护的粘粒组外, 其余各组分碳含量均与总有机碳含量呈显著或极显著相关。这说明, 目前复垦土壤中有机碳主要是以活性有机碳组分的形式进行储存, 可能存在受环境和人为管理措施影响从而释放的潜在风险, 所以需要合理的管理措施 (如增加外源碳的投入量) 和长时间的恢复, 才能使有机碳达到更有效的累积和固存, 从而恢复复垦土壤的“碳汇”功能。

## 4 结论

不论施肥与否, 玉米-大豆轮作比自然恢复更有效地增加了复垦区土壤的有机碳含量, 5 年平均提高了 31.0%, 单施有机肥的土壤有机碳含量可增加 49.3%, 是矿区复垦土壤快速恢复和培肥的有效措施。

复垦土壤中新增的有机碳优先固存于活性较高的游离活性碳组分和物理保护碳组分中。由于新增有机碳活性较高, 需要较长时间的稳定投入, 形成稳定性较高的化学保护态及生物化学保护态组分, 进而恢复土壤功能。

## 参考文献:

- [1] 唐孝辉. 山西采煤沉陷区现状、危害及治理[J]. 生态经济, 2016, 32(2): 6-9.  
Tang X H. Present situation, harm and treatment of coal mining subsidence area in Shanxi Province[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(2): 6-9.
- [2] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策[J]. 能源环境保护, 2003, 17(3): 3-7.  
Hu Z Q, Wei Z Y. Problems and countermeasures of mining and reclamation soil in coal mining area[J]. *Energy Environmental Protection*, 2003, 17(3): 3-7.
- [3] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [4] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 344-348.
- [5] Six J, Paustian K, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [6] 李建华, 李华, 邵春花, 等. 长期施肥对晋东南矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(5): 192-198.  
Li J H, Li H, Gao C H, *et al.* Effects of long-term fertilization on reclaimed soil aggregate stability and distribution of carbon in the southeastern Shanxi mining area[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(5): 192-198.
- [7] 何冰, 李廷亮, 栗丽, 等. 复垦土壤水稳性团聚体碳氮分布对施肥的响应[J]. 天津农业科学, 2019, 25(3): 47-53.  
He B, Li T L, Li L, *et al.* Response of carbon and nitrogen distribution of water-stable aggregates to fertilization in reclaimed soil[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(3): 47-53.
- [8] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 99-109.  
Lu T W, Cai A D, Xu M G, *et al.* Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 99-109.
- [9] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, *et al.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 745-752.
- [10] Tong X G, Xu M G, Wang X J, *et al.* Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251-259.
- [11] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [12] 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.  
Yuan Y R, Zou W X, Hao X X, *et al.* Response of aggregate-associated carbon in Mollisols to application rate of organic manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3235-3242.
- [13] 邓文悦, 柳开楼, 田静, 等. 长期施肥对水稻土不同功能有机质库碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 468-479.  
Deng W Y, Liu K L, Tian J, *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution of carbon and nitrogen in different functional soil organic matter fractions in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 468-479.
- [14] Stewart C E, Plante A F, Paustian K, *et al.* Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(2): 379.
- [15] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, *et al.* Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 357-366.
- [16] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [17] Ussiri D A N, Jacinthe P A, Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review[J]. *Geoderma*, 2014, 214-215: 156-167.
- [18] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 208-213.  
Jiao H, Li T L, Gao J W, *et al.* Effects of fertilization on light and heavy fractions organic nitrogen in reclaimed soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 208-213.
- [19] 何浩, 危常州, 李俊华, 等. 商品有机肥替代部分化肥对玉米生长、产量及土壤肥力的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(2): 325-332.  
He H, Wei C Z, Li J H, *et al.* Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on maize growth, yield and soil fertility[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(2): 325-332.
- [20] Banger K, Kukul S S, Toor G, *et al.* Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farmyard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318: 27-35.
- [21] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2006, 27(6): 2642-2650.  
Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 27(6): 2642-2650.
- [22] Jiang M B, Wang X H, Liusui Y H, *et al.* Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil[J]. *Catena*, 2017, 149: 437-445.
- [23] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345-353.
- [24] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63(3-4): 133-139.
- [25] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 104-111.  
Wang S L, Wang G L, Zhao X, *et al.* Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 104-111.
- [26] Mrabet R, Saber N, El-Brahli A, *et al.* Total, particulate organic matter and structural stability of a calcixeroll soil under different



- wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 57(4): 225–235.
- [27] 刘骅, 佟小刚, 许咏梅, 等. 长期施肥下灰漠土有机碳组分含量及其演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 794–800.  
Liu H, Tong X G, Xu Y M, *et al.* Evolution characteristics of organic carbon fractions in gray desert soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(4): 794–800.
- [28] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, *et al.* Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19–31.
- [29] 徐香茹, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 753–760.  
Xu X R, Cai A D, Xu M G, *et al.* Characteristics of organic carbon stabilization in paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 753–760.
- [30] Xu X R, Zhang W J, Xu M G, *et al.* Characteristics of differently stabilised soil organic carbon fractions in relation to long-term fertilisation in brown earth of Northeast China[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 572: 1101–1110.
- [31] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3817–3825.  
Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, *et al.* Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3817–3825.
- [32] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1–2): 1–22.
- [33] 王小利, 郭振, 段建军, 等. 黄壤性水稻土有机碳及其组分对长期施肥的响应及其演变[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(23): 4593–4601.  
Wang X L, Guo Z, Duan J J, *et al.* The changes of organic carbon and its fractions in yellow paddy soils under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4593–4601.
- [34] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 卢昌艾. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3664–3671.  
Tong X G, Xu M G, Zhang W J, Lu C A. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3664–3671.
- [35] Aoyama M, Angers D A, N' Dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(2): 295–302.