

施用有机肥煤矿复垦耕地有机碳的固持效率及组分变化

徐明岗^{1,2}, 李然^{1,2}, 孙楠^{2*}, 安永齐³, 王小利³, 靳东升¹, 李建华¹,
张强¹, 洪坚平⁴, 申华平²

(1山西农业大学生态环境产业技术研究院 / 土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 山西太原 030031;
2中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081;
3贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 4山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801)

摘要:【目的】研究长期施用不同量有机肥下复垦耕地总有机碳(SOC)及其各组分的固碳效率变化, 为煤矿区复垦土壤肥力快速提升提供理论依据。【方法】山西煤矿塌陷区复垦长期定位试验始于2008年, 设置不施肥(CK)、施用化肥(F)、化肥配施低量有机肥(LMF)和化肥配施高量有机肥(HMF)4个处理。2019年玉米收获前, 采集0—20 cm土层土壤样品, 采用物理-化学联合分组方法, 测定土壤总有机碳(SOC)及各组分有机碳含量, 分析碳投入与土壤总有机碳及各组分有机碳含量之间的关系。【结果】复垦11年后, 与CK相比, F、LMF和HMF处理SOC含量分别显著增加了23.8%、39.6%和82.1%($P<0.05$), 固碳速率分别达到0.57、0.83和1.28 t/(hm²·a)。复垦土壤的固碳效率为20.9%, 游离态颗粒有机碳组分的固碳效率最大(9.0%), 是土壤固碳的主要形式。与CK相比, F处理的土壤游离态颗粒有机碳、化学保护粘粒组有机碳和生物化学保护粘粒组有机碳储量分别提高37.1%、52.3%和93.5%, 而LMF和HMF处理提高了土壤游离态粗颗粒有机碳组分、物理保护有机碳、化学保护粉粒组和粘粒组有机碳及生物化学保护粘粒组有机碳储量。与CK相比, HMF处理对上述各组分的提升幅度分别为66.1%、179.6%、59.7%、48.6%及63.0%; 与LMF处理相比, HMF处理对各组分的提升幅度分别为19.6%、32.1%、28.5%、5.3%和7.3%。与CK和F处理相比, LMF和HMF处理显著提高了土壤物理保护有机碳在总有机碳中的分配比例。复垦土壤有机碳年均固定量均与年均碳投入量之间极显著正相关, 复垦土壤各组分有机碳年均固定量与年均碳投入量之间极显著正相关($P<0.01$)。【结论】复垦土壤有机碳年均固定量与碳投入量之间极显著正相关, 在复垦11年后, 复垦土壤仍有很大的固碳潜力, 固存的有机碳主要以游离态颗粒有机碳为主。施用高量有机肥是快速恢复煤矿区复垦土壤有机碳含量的有效措施。

关键词:复垦耕地; 土壤有机碳; 物理-化学联合分组; 固碳效率

Soil organic carbon sequestration efficiency and fractions as affected by organic fertilization rate in reclaimed cultivated land

XU Ming-gang^{1,2}, LI Ran^{1,2}, SUN Nan^{2*}, AN Yong-qi³, WANG Xiao-li³, JIN Dong-sheng¹, LI Jian-hua¹,
ZHANG Qiang¹, Hong Jian-ping⁴, SHEN Hua-ping²

(1 Institute of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University / Shanxi Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 3 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 4 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract:【Objectives】We studied the variation of carbon sequestration efficiency of reclaimed soil after long-term application of organic fertilizer rates, to provide a theoretical basis for rapid reclamation of soil fertility in the subsidence area of coal mines.【Methods】The reclamation experiment, started in 2008, was located in the subsidence area of Shanxi coal mines. The treatments included no fertilizer input control (CK), chemical fertilizer

收稿日期: 2022-04-06 接受日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1710255)。

联系方式: 徐明岗 E-mail: xuminggang@caas.cn; *通信作者 孙楠 E-mail: sunnan@caas.cn

(F), and low-level manure with chemical fertilizer (LMF) and high-level manure with chemical fertilizer (HMF). Before the harvest of maize in 2019, soil samples (0–20 cm) were collected for the measurement of total organic carbon (SOC). The SOC was further fractioned using a physical-chemical fractionation method for the quantitative analysis of SOC stock in different fractions. **[Results]** After 11 years of reclamation, compared with CK, fertilization (F, LMF, and HMF) significantly increased the total SOC by 23.8%, 39.6%, and 82.1% ($P<0.05$), respectively. The sequestration rates of SOC under F, LMF and HMF treatments were 0.57, 0.83, and 1.28 t/(hm²·a), respectively. The carbon sequestration efficiency of the reclaimed soil was averagely 20.9%. Among the seven organic carbon fractions, the unprotected organic carbon fraction had the highest carbon sequestration efficiency of 9.0% and was the main form of soil carbon sequestration. Compared with CK, F treatment significantly increased the unprotected organic carbon fraction, the chemically protected fraction, and the biochemically protected clay fraction (37.1%, 52.3%, and 93.5%); LMF and HMF treatment significantly increased the content of unprotected coarse organic carbon fraction, physical protection fraction, chemical protection silt fraction and clay fraction, and biochemical protection clay fraction (66.1%, 179.6%, 59.7%, 48.6%, and 63.0%), and the increment effects of HMF on the above fractions were significantly higher than LMF (19.6%、32.1%、28.5%、5.3% and 7.3%). The annual average total carbon sequestration and that in each fraction were all positively and significantly correlated with the annual average organic carbon input ($P<0.01$).

[Conclusions] The annual input rate of organic carbon significantly affects the carbon sequestration efficiency, after 11 years of conservative application of manure, the reclaimed soil still has huge carbon sequestration potential, and the highest carbon sequestration efficiency is in the unprotected organic carbon fraction. Therefore, high-level organic fertilizer input is an effective measure to quickly restore the organic carbon content in the reclamation of coal mining soil.

Key words: reclaimed arable land; soil organic carbon; physical-chemical fractionation; carbon sequestration efficiency

农田土壤有机碳是土壤肥力的核心指标，对改善土壤质量、提高作物生产力及维持农业可持续发展影响巨大，而矿区复垦土壤有机碳含量低，成为地力提升的限制因素^[1]。因此，深入探讨复垦土壤有机碳的固持机理对于煤矿区复垦土壤肥力快速提升具有重要意义。

输入的外源有机碳固存为土壤有机碳的比例即为土壤固碳效率，其受到土壤属性、施肥管理措施及气候等因素的共同影响^[2]。Zhang 等^[3]在我国 6 种典型农田土壤上的研究发现，土壤有机碳增长量与碳投入量之间呈现出极显著线性正相关关系，其中张掖灌漠土的固碳效率最高(31.0%)，固碳效率最低的为郑州潮土(6.9%)。但也有研究表明，土壤有机碳随着碳投入的增加表现为曲线增长趋势^[4-5]。土壤各组分有机碳因为其不同的固碳能力，在土壤有机碳的累积和稳定中起着不同的作用，因此其分组技术是研究土壤有机碳固持机理的重要方法^[6]。其中，Stewart 等^[7]对 Six 等^[4]的团聚体分组方法进行了改进，提出了最新的物理-化学联合分组方法，该方法将土壤有机碳的稳定机制在原理上进行联系，进而

将土壤有机碳固存分为非保护、物理、化学及生物化学保护机制，更能说明各组分有机碳在土壤有机碳中的固存作用。曹寒冰等^[5]研究表明，6 年施肥措施下复垦土壤各组分有机碳均显著增加，但粉黏粒组分有机碳在不同施肥下基本不变。Xu 等^[8]在东北褐土中研究也发现，稳定有机碳组分不变，总有机碳仍然随施肥量增加显著增长。Tong 等^[9]研究也表明，各种施肥措施下矿物结合态颗粒的固碳效率均最大。Stewart 等^[10]研究也提出，当土壤总有机碳增加时，化学和生物化学保护组分有机碳可能不变，碳的积累可能发生在未保护和物理保护组分中。目前，有关施肥对土壤有机碳组分影响的相关研究较多，但多集中于农田生态系统；矿区复垦土壤有机质含量仅是煤矿开采前的 20%~30%；土壤质地较粗，特别是土壤团聚体中微团聚体比例较少，显著低于煤矿开采前的土壤^[11]。长期化肥与有机肥配施下，煤矿区复垦土壤中总有机碳及不同组分碳含量与外源碳投入量之间的关系有待明确。利用 Stewart 等^[7,10]提出的物理-化学联合分组方法，探讨复垦土壤中不同组分有机碳在不同施肥措施下的固碳特征及机

理, 尚未见报道。

因此, 本研究以山西煤矿复垦区长期定位试验为基础, 利用 Stewart 土壤有机碳分组方法, 揭示复垦耕地总有机碳及各组分碳与外源碳投入量之间的关系, 探讨不同施肥措施下土壤有机碳的固存特征和固碳机理, 为复垦土壤培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于山西省典型煤矿复垦基地的长治市襄垣县王桥镇西山底村 ($36^{\circ}27'N$, $113^{\circ}1'E$), 为黄土塬地貌。该区属暖温带大陆性季风气候, 年均温 $9.5^{\circ}C$, 年均降水量 532.8 mm 。20世纪70年代开始因采煤出现地面塌陷, 到2000年前后塌陷趋于稳定, 地势在塌陷后呈马鞍状, 最大落差达到 $4\sim 5\text{ m}$, 使原有农田变成了旱薄地, 土壤肥力严重下降。土壤为褐土, 试验开始前土壤耕层 (0—20 cm) 有机碳含量 5.36 g/kg 、全氮含量 0.63 g/kg 、有效磷含量 3.2 mg/kg 、速效钾含量 143.8 mg/kg 、土壤容重 1.53 g/cm^3 ^[12]。土壤比较紧实, 氮、磷养分十分缺乏。

1.2 试验设计与田间管理

2008年3月选择年限相同的塌陷农田, 采用混推 (直接推高垫低后整平土地) 的方式进行复垦, 2008年4月修复工程完成后, 对试验地整平和均匀处理, 以保证试验地耕层土壤性质一致。种植作物为春玉米, 种植制度为一年一熟, 种植密度为 $60000\text{株}/\text{hm}^2$, 于每年5月左右播种, 10月左右收获。基地到2018年进行了11年复垦。

试验包括4个处理: 1) 不施肥 (CK); 2) 施化肥 (F); 3) 化肥配施低量有机肥 (LMF); 4) 化肥配施高量有机肥 (HMF)。其中, 供试有机肥为完全腐熟的羊粪, 2008—2011年, 羊粪含有机碳44.2%、N 2.5%、P 1.2% 和 K 3.2%; 2012—2018年, 优化施肥, 进而减少有机肥施用量, 羊粪含有机碳31.0%、N 0.8%、P 3.5% 和 K 0.1%。每年化肥和有机肥均作为基肥在玉米播种前一周一次性撒施, 之后翻耕入土。试验采用裂区设计, 每个处理3次重复, 每个小区面积 150 m^2 。各施肥处理的具体施肥量见表1。

1.3 样品采集、测定项目与方法

于2018年春玉米收获前, 用环刀法测定土壤容重。春玉米收获后, 采集耕层 (0—20 cm) 新鲜土样。每个小区加大采样点, 方格法采取 $10\sim 15$ 个样点, 以减小复垦地空间异质性带来的影响, 采集完

表1 各处理肥料用量 (kg/hm^2)

Table 1 Application rates of N, P, K, and manure in each treatment

处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O	有机肥 Manure	
	2008—2018	2008—2011		2012—2018	
CK	0	0	0	0	0
F	108	72	60	0	0
LMF	108	72	60	4425	2700
HMF	108	72	60	17700	10800

样品混匀后装袋并小心运回实验室, 样品风干后过 2 mm 筛备用。取部分土壤样品用于土壤有机碳含量的测定, 测定方法为重铬酸钾容量法^[13]; 另取一部分土壤样品用于有机碳分组。

土壤有机碳分组采用 Stewart 等^[7]的物理-化学联合分组方法。其试验步骤可分为如下3步: 第一步, 称取 20.00 g 风干土样置于团聚体分离器中 (上下层分别为 0.25 和 0.053 mm 的筛子), 震荡 20 min (速率 30 r/min), 粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的为粗颗粒有机碳组分 (cPOC), 粒径 $>0.053\text{ mm}$ 的为微团聚体组分 (μ agg), 将粒径 $<0.053\text{ mm}$ 的部分用离心法分别于 900 和 3300 r/min (加入 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); 第二步, 将第一步中得到的微团聚体组分进行密度浮选, 加 50 mL NaI (1.70 g/cm^3) 并离心 (4000 r/min) 20 min , 抽滤得到轻组部分 (LF), 即未保护细颗粒有机碳组分 (fPOC), 重组部分用酒精和蒸馏水洗净后加入 50 mL 六偏磷酸钠溶液 (5 g/L) 震荡 18 h (180 r/min) 后过 0.053 mm 筛, 留在筛上的为物理保护有机碳组分 (iPOC), 剩余部分同样使用离心法得到闭蓄态粉粒组分 (μ -silt) 和闭蓄态粘粒组分 (μ -clay); 第三步, 将前两步得到的所有粘粉粒组分加入 25 mL 的 HCl 溶液 (6 mol/L), 于 95°C 下回流 16 h 后抽滤, 留在滤膜上的部分为非酸解组分 (NH-dsilt 、 NH-dclay 、 $\text{NH-}\mu\text{silt}$ 、 $\text{NH-}\mu\text{clay}$), 酸解组分 (H-dsilt 、 H-dclay 、 $\text{H-}\mu\text{silt}$ 、 $\text{H-}\mu\text{clay}$) 为全组分与非酸解组分之差。将各组分加入 1 mol/L 的 HCl (土液比 $1:2.5$) 以排除土样中的无机碳, 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态颗粒有机碳组分 (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 、 $\text{H-}\mu\text{silt}$ 、 $\text{H-}\mu\text{clay}$) 和生物化学保护有机碳组分 (NH-dsilt 、 NH-dclay 、 $\text{NH-}\mu\text{silt}$ 、 $\text{NH-}\mu\text{clay}$) 4个有机碳

组分。

1.4 计算方法

1.4.1 土壤固碳量计算 土壤的固碳速率 [$C/(hm^2 \cdot a)$] 采用差减法计算, 即目前各试验处理耕层土壤的碳储量 (S_t , t/hm^2) 与该试验起始年份耕层土壤碳储量 (S_0 , t/hm^2) 差值的年 (n) 平均变化, 也可以称为研究期间土壤有机碳年均固定量^[14]。

$$S_0 = C_0 \times B_0 \times D \quad (1)$$

$$S_t = C_t \times B_t \times D \quad (2)$$

$$C_{av.} = (S_t - S_0)/n \quad (3)$$

不同颗粒组分中 SOC 储量的计算:

$$S_i = C_i \times A_i \times B_i \times D \quad (4)$$

其中, A_i 为各组分含量占全土的百分比 (%), i 为不同的组分数; C_0 和 C_t 分别为试验开始时和目前有机碳含量 (g/kg); B_0 和 B_t 分别为试验开始时和目前耕层土壤容重 (g/cm^3), n 为各处理复垦的年限; D 为耕层深度 (20 cm)。

1.4.2 土壤碳投入的计算 本试验中 2008—2013 年每季玉米收获后进行秸秆还田。2013 年后改善施肥措施, 玉米秸秆全部移除不还田, 只施用有机肥。土壤碳投入的估算方法^[15-16]如下:

$$SCI = [(Mg + Ms) \times Rr \times Rb + Sc \times Ms] \times (1 - W) \times C \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$BCI = Ms \times (1 - W) \times C \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中, SCI 为玉米根茬碳投入 ($C t/hm^2$); BCI 为玉米秸秆碳投入 ($C t/hm^2$); Mg 为玉米籽粒产量 (kg/hm^2); Ms 为玉米秸秆产量 (kg/hm^2); Rr 为玉米地下部分根系生物量占地上部分生物量的比例 (根冠比), 为 26%; Rb 为玉米根系生物量平均分布在 0—20 cm 土层的比例, 为 85.1%; Sc 为玉米留茬占秸秆的比例,

为 3%; W 为玉米风干基含水率, 为 14%; C 为玉米烘干基碳含量, 为 44.4%。

$$OCI = C_m \times A_m \times (1 - W_m) \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中, OCI 为有机肥碳投入 ($C t/hm^2$); C_m 为有机肥有机碳含量 (g/kg); W_m 为有机肥含水率 (%); A_m 为有机肥鲜重 (kg/hm^2)。

1.4.3 土壤固碳效率的计算 土壤对外源碳的固碳效率 (R), 是土壤固碳量占总投入外源碳量的比例, 计算公式如下:

$$R = (S_t - S_0)/(SCI + BCI + OCI) \quad (8)$$

式中, R 也可以由土壤碳储量随外源投入碳量变化的响应关系斜率获得。

1.5 数据处理

试验结果采用 Excel 2016、SigmaPlot 14.0、SPSS 22 等软件进行统计性检验 (正态性、方差齐性) 与分析。不同施肥处理之间的差异采用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验 ($P < 0.05$)。所有土壤测定结果均以 3 次测定结果的平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量的变化

2.1.1 土壤总有机碳含量和储量 复垦 11 年后, 土壤总有机碳含量和储量均表现为 HMF>LMF>F>CK (表 2)。相比于 CK, F 处理的土壤总有机碳含量增加了 23.8%, LMF 和 HMF 分别增加了 39.6% 和 82.1%。其中 HMF 处理的效果最为显著, 有机碳含量达到 13.45 g/kg, 分别是 F 和 LMF 的 1.47 和 1.30 倍。复垦 11 年后, 所有处理的土壤有机碳储量均显著提高, F、LMF 和 HMF 处理分别是 CK 处理的 1.22、1.37 和 1.64 倍, 土壤的固碳速率分别为 0.57、

表 2 不同施肥处理复垦土壤 0—20 cm 土层有机碳储量 (2018 年)

Table 2 Storage of organic carbon in top 0—20 cm layer of reclaimed land under different fertilization treatments in 2018

处理 Treatment	有机碳含量 (g/kg) SOC content	土壤容重 (g/cm ³) Bulk density	有机碳储量 (C t/hm ²) SOC stock	碳储量变化 (C t/hm ²) Change of C stock	固碳速率 [C t/(hm ² ·a)] Sequestration rate
初始 Initial	5.36	1.53	16.40		
CK	7.38±0.24 d	1.27	18.65±1.06 d	2.25±0.61 d	0.20±0.06 d
F	9.14±0.29 c	1.24	22.69±1.25 c	6.29±0.72 c	0.57±0.07 c
LMF	10.31±0.28 b	1.24	25.49±1.21 b	9.09±0.70 b	0.83±0.06 b
HMF	13.45±0.03 a	1.13	30.52±0.11 a	14.12±0.06 a	1.28±0.01 a

注: SOC—土壤有机碳; CK、F 为不施肥对照和只施化肥, LMF、HMF 为低量和高量有机无机肥配合处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: SOC—Soil organic C. CK and F are blank control and chemical fertilizer treatment, and LMF and HMF are chemical fertilizer with low and high manure amount treatment. Different small letters after the data in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

0.83 和 1.28 t/(hm²·a)。HMF 处理是快速提高复垦土壤有机碳储量的最佳方式, 其固碳速率分别是 CK、F 和 LMF 处理的 6.29、2.24 和 1.55 倍。

2.1.2 土壤有机碳组分储量及分配比例 长期不同施肥处理的复垦土壤各组分有机碳储量存在差异, 差异主要在各组分中的粗颗粒或粉粒组中, 而细颗粒或粘粒组 3 个施肥处理之间无显著差异(表 3)。相比于 CK, F 处理的 cPOC、H-clay 和 NH-clay 有机碳储量分别提高了 37.1%、52.3% 和 93.5%; LMF、HMF 处理的 cPOC、iPOC、H-silt 和 H-clay 以及 NH-clay 组的有机碳储量比 CK 分别提高了 38.9%~66.1%、11.7%~179.6%、24.3%~59.7%、41.1%~48.6% 和 51.9%~63.0%; HMF 的提升效果高于 LMF, 其各组分分别提升了 19.6%、32.1%、28.5%、5.3% 和 7.3%。

游离态颗粒有机碳组分占总有机碳比例最大, 平均为 48.5%; 其次为稳定碳组分(生物化学保护有机碳和化学保护有机碳), 平均分别为 31.2% 和 12.9%; 物理保护有机碳组分比例最小, 平均为 7.4% (图 1)。相比于 CK 和 F, 施有机肥处理(LMF、HMF)显著提高了物理保护有机碳组分的占比。相比于 CK, 施化肥处理(F)显著降低了生物化学保护组分的比例。

2.2 土壤有机碳水平与碳投入量的关系

2.2.1 不同施肥处理的土壤碳投入量 由图 2 可以看出, 长期施肥显著提高碳投入, 相比于 CK, 根茬碳投入平均提高了 3.01 倍, LMF 的根茬碳年投入量达到了 3.41 t/(hm²·a)。根茬与有机肥共同的年均碳投

入量以 HMF 处理为最高, 为 6.29 t/(hm²·a), 分别比 CK、F 和 LMF 高 4.64、1.04 和 0.46 倍。

2.2.2 土壤总有机碳年均固持量与年均投入量的关系

复垦土壤总有机碳年均固定量与年均投入量之间呈极显著正相关关系(图 3)。拟合方程的斜率表示复垦土壤的固碳效率, 为 20.9%。图中虚线的交点为当方程中 y 为零时 x 的值, 其值是土壤有机碳维持平衡的最低碳投入量。因此, 在复垦初期 11 年间, 要维持该土壤有机碳储量的稳定, 每年平均需要的最低碳投入量为 0.24 t/(hm²·a)。

2.2.3 土壤各组分有机碳年均固定量与年均投入量的关系

相关分析结果(图 4)表明, 游离态颗粒有机碳组分、物理保护有机碳组分、化学保护有机碳组分和生物化学保护有机碳组分的年均固定量均与年均碳投入量之间呈极显著正相关关系($P<0.01$), 其直线斜率表示复垦土壤各组分的固碳效率。拟合方程显示, 游离态颗粒组分的固碳效率最高(9.0%), 其次为生物化学保护组分(6.0%), 再次为物理保护组分(3.4%)和化学保护组分(2.5%), 其中游离态颗粒组分是其余组分的 1.50~3.6 倍, 可见目前增加的有机碳主要固持在游离态颗粒组分中。

3 讨论

长期不同施肥对复垦土壤总有机碳及其各组分有机碳的含量均有显著提升作用, 提升幅度为化肥配施高量有机肥(HMF)>化肥配施低量有机肥(LMF)>施用化肥(F)>不施肥(CK), 这与前人^[17-18]的研究结果相似, 说明提升土壤有机碳的最佳方式是化肥配

表 3 长期施肥下 0—20 cm 土层土壤各组分有机碳储量(C t/hm²)

Table 3 Stocks of different organic carbon fractions in 0—20 cm top soil under different fertilization treatments

处理 Treatment	游离态 Unprotected organic C		物理保护态 Physically-protected organic C (iPOC)		化学保护态 Chemically-protected organic C H-Silt		生物化学保护态 Biochemically-protected organic C NH-Silt NH-Clay	
	cPOC	fPOC			H-Clay	NH-Silt	NH-Clay	
CK	8.06±0.36 c	0.74±0.17 a	1.03±0.12 c	1.44±0.10 c	1.07±0.10 b	5.23±0.64 bc	1.08±0.16 b	
F	11.04±0.29 b	1.03±0.10 a	1.41±0.07 c	1.22±0.12 c	1.63±0.12 a	4.26±0.26 c	2.09±0.08 a	
LMF	11.20±0.61 b	0.66±0.04 a	2.18±0.20 b	1.79±0.03 b	1.51±0.06 a	6.51±0.24 ab	1.64±0.21 a	
HMF	13.39±0.22 a	0.87±0.12 a	2.88±0.11 a	2.30±0.09 a	1.59±0.05 a	7.73±0.27 a	1.76±0.07 a	

注: CK、F 为不施肥对照和只施化肥, LMF、HMF 为低量和高量有机无机肥配合处理; cPOC 为游离态粗颗粒有机碳, fPOC 为游离态细颗粒有机碳, iPOC 为物理保护态有机碳, H-Silt 为化学保护态粉粒组有机碳, H-Clay 为化学保护态粘粒组有机碳, NH-Silt 为生物化学保护态粉粒组有机碳, NH-Clay 为生物化学保护态粘粒组有机碳; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: CK and F are blank control and chemical fertilizer treatment, and LMF and HMF are chemical fertilizer with low and high manure amount treatment. cPOC is unprotected coarse particulate organic carbon; fPOC is unprotected fine particulate organic carbon; iPOC is intra-aggregate particulate organic carbon; H-Silt is chemical protection silt organic carbon fraction; H-Clay is chemical protection clay organic carbon fraction; NH-Silt is biochemical protection silt fraction; NH-Clay is biochemical protection clay fraction. Different small letters after the data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$)。

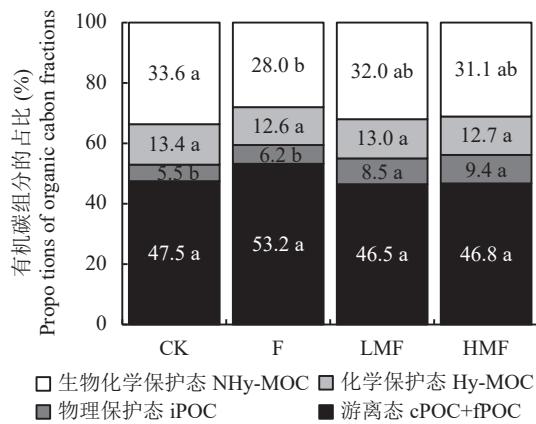


图1 长期施肥下耕层土壤(0—20 cm)各组分有机碳在总有机碳中的占比

Fig. 1 Proportions of each organic carbon fraction to total organic carbon in topsoil (0—20 cm) under long-term fertilization

注：柱中不同小写字母表示同一有机碳组分处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters in the bars indicate significant difference among treatments for the same organic carbon fraction ($P<0.05$)。

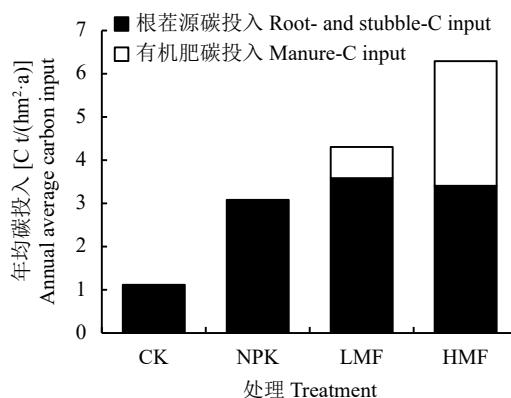


图2 不同施肥处理下年均有机碳投入量(2008—2018)

Fig. 2 Annual average organic carbon input under different fertilizations between 2008 and 2018

施高量有机肥。作物根系及其分泌物、作物残茬和有机肥料的施用为土壤有机碳的主要输入方式^[19-20]。施用有机肥直接增加了土壤的碳投入，有机肥又是腐熟的，更有助于土壤有机碳的累积^[21]。化肥的施用则是通过促进作物根系生长和增加作物残茬量间接增加土壤的碳投入^[22]，本试验中在复垦11年间，所有处理土壤的固碳速率均显著提高，其中化肥配施高量有机肥[C 1.28t/(hm²·a)]的效果最佳，与Tripathi等^[23]所研究的矿区修复20年左右土壤的固碳速率[C 1.35 t/(hm²·a)]相似，其原因是配施高量有机肥下的碳投入[C 6.29 t/(hm²·a)]显著高于其余处理[C 1.12~4.31 t/(hm²·a)]，能直接提供土壤和作物所需的碳源^[24]，进而提高了土壤的固碳速率。

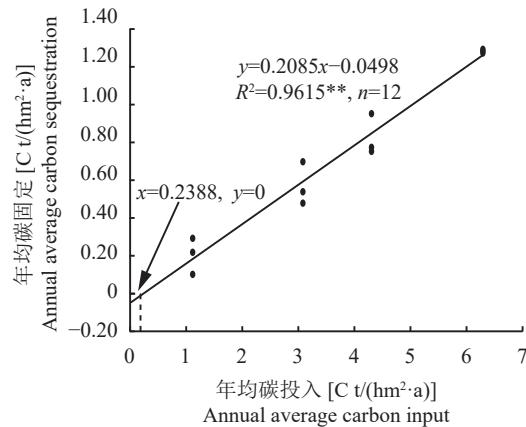


图3 土壤年均固碳量与年均碳投入量的关系

Fig. 3 Relationship between annual average carbon sequestration and annual average carbon input

注：图中的12个点为所有处理对应的值；图中箭头的指向为2条虚线的交点，即 y 为0时， x 的值。

Note: The 12 points in the figure are the values corresponding to all treatments. The point of arrow in the figure is the intersection of the two dashed lines, that is, the value of x when y is 0.

因为土壤有机碳组分的异质性，土壤各组分有机碳含量对不同施肥的响应程度也不同^[25-26]。对农业管理措施响应更敏感的活性碳组分是游离态粗颗粒有机碳组分和物理保护有机碳组分^[4]，本试验中游离态颗粒有机碳组分占到总有机碳含量的48.5%，其中主要固存形式是粗颗粒组分(cPOC)。这主要是因为新鲜的作物残茬和动物残体主要提供土壤有机碳中游离态粗颗粒有机碳组分^[27]，土壤团聚体对其保护很弱，所以其可作为有机碳受外界影响而变化的指示性碳组分^[21]；而在各处理之间细颗粒组分(fPOC)的有机碳含量无显著差异，可能是因为细颗粒组分中有机碳含量变异较大造成的。本研究中稳定性有机碳组分(化学保护和生物化学保护组分)在总有机碳中的占比为44.1%，是复垦土壤中有机碳的主要固存形式。其中有机肥施用(LMF和HMF)显著提升了粉粒组(silt)有机碳含量，这与樊廷录等^[28]的研究结果一致，其原因可能是施用有机肥增强了土壤微生物的活性，促进其代谢分泌物的增加，土壤微生物活性的中间代谢产物直接转移到粘粉粒组分中，使其组分有机碳得到累积^[24,29]。而与CK相比，各施肥处理的粘粒组有机碳含量显著提升，但各施肥处理之间差异不显著，主要是因为粘粒组分有机碳被土壤强烈吸附，其周转过程较慢^[8]。施有机肥(LMF和HMF)主要提升了物理保护组分在总有机碳中的占比，其原因是有机肥可以通过增加有机碳胶结物和增加真菌的比例，从而改善土壤中的团聚体结构，

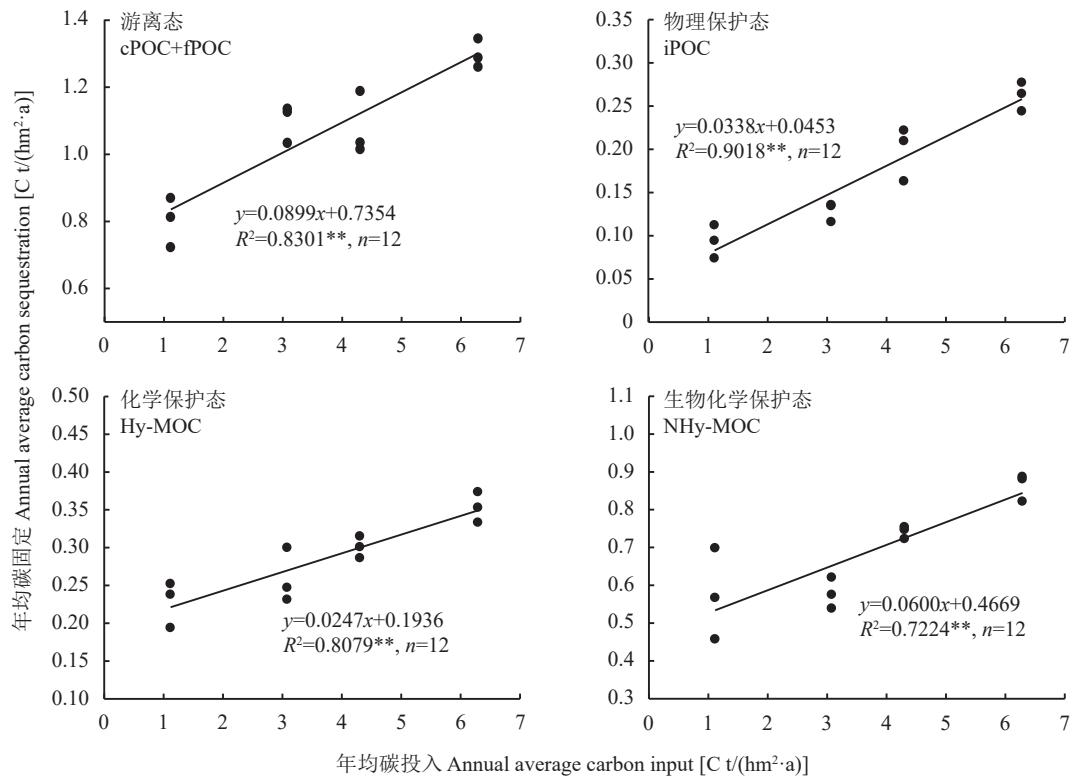


图 4 年均碳投入量与各组分有机碳年均固定量的关系

Fig. 4 Relationship between annual average carbon input and average sequestration of soil organic carbon fractions

进而显著增加土壤有机碳的物理保护作用^[5,30]。

本研究表明, 在混推复垦方式下, 土壤总有机碳的年均碳固定量与年均外源碳投入量之间极显著正相关, 固碳效率为 20.9%。此结果比魏猛等^[31]在潮土上的研究结果(18.2%)稍高, 主要原因是研究区为采煤塌陷后的复垦地, 土壤基础肥力低^[32], 且试验区低温、缺水, 所以微生物活性较弱, 使有机碳周转较慢, 损失较少^[33]。同时本研究结果表明, 在混推复垦的方式下, 复垦初期 11 年间每年需要的碳最少投入量为 0.24 t/(hm²·a), 这样才能维持土壤有机碳储量的稳定。

本研究表明, 复垦土壤所有组分有机碳年均固定量均与年均碳投入之间极显著正相关, 说明目前复垦土壤还具有很大的固碳潜力, 这与 Zhang 等^[3]在北方地区长期定位试验点研究的结果一致。其中游离态粗颗粒有机碳组分年均固碳量与年均碳投入间关系的变化率(固碳效率)最大(9.0%), 说明该组分是复垦土壤新碳的主要固存形式^[34]。而化学保护和生物化学保护有机碳组分(稳定碳组分)年均碳固量与年均碳投入间也极显著线性相关, 它们是土壤固碳的主要组分, 它们的固碳效率分别为 2.5% 和 6.0%, 这可能是因为稳定有机碳组分主要是土壤中粘粉粒

与有机物分解最终产物相结合的部分, 而粘粉粒在土壤中占比较大, 且颗粒小, 比表面积大, 有助于与外源碳的接触, 从而拥有较强的吸附碳的能力^[9,32]。

4 结论

1) 长期施肥均显著提高了矿区复垦土壤的有机碳储量, 其中以化肥配施高量有机肥效果最为显著, 其有机碳储量相较于不施肥提高了 63.7%, 其固碳速率为 1.28 t/(hm²·a), 是矿区复垦土壤快速恢复和培肥的有效措施。

2) 复垦土壤有机碳年均固定量与外源年均碳投入量之间极显著正相关, 其固碳效率为 20.9%, 说明复垦土壤有极大的固碳潜力; 复垦初期 11 年间每年最少需投入碳量为 0.24 t/(hm²·a), 才能维持复垦土壤有机碳储量的稳定。

3) 游离态颗粒有机碳组分平均占到了总有机碳储量的 48.5%, 是当前土壤有机碳的主要储存组分; 且其年均固定量与年均碳投入之间拟合方程的斜率(固碳效率)在各组分中最大(9.0%), 是评价土壤有机碳受外界影响的主要指标。化学保护和生物化学保护有机组分(稳定碳组分)作为评价土壤有机碳储存能力的指标, 与年均碳投入间呈极显著的线性关

系, 其固碳效率分别为2.5%、6.0%, 证明其具有很大的固碳能力。

参 考 文 献:

- [1] 栗丽, 李廷亮, 孟会生, 等. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤养分及微生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6): 1156–1160.
- Li L, Li T L, Meng H S, et al. Effects of combined application of microbial agents and fertilizers on soil nutrients and microbial characteristics in reclaimed soil[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(6): 1156–1160.
- [2] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 42–51.
- Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. *Biogeoosciences*, 2010, 7(2): 409–425.
- [4] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [5] 曹寒冰, 谢均宇, 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.
- Cao H B, Xie J Y, Qiangjiu C R, 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*, 2020, 36(18): 135–143.
- [6] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 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, et al. 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.
- [7] 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 and Biochemistry*, 2009, 41(2): 357–366.
- [8] 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.
- [9] Tong X G, Xu M G, Wang X Y, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251–259.
- [10] 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): 379–392.
- [11] 张志权, 束文圣, 廖文波, 等. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(2): 47–52.
- Zhang Z Q, Shu W S, Liao W B, et al. Role of legume species in revegetation of mined wastelands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(2): 47–52.
- [12] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006, 256–259.
- Shanxi Statistical Bureau, Survey Office of National Bureau Statistical in Shanxi. Shanxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistical Press, 2006, 256–259.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 30–33.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000, 30–33.
- [14] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 868–875.
- Zhang J Y, Zhang W J, Xu M G, et al. Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 868–875.
- [15] Kundu S, Bhattacharyya R, Prakash V, et al. Carbon sequestration and relationship between carbon addition and storage under rainfed soybean–wheat rotation in a sandy loam soil of the Indian Himalayas [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1–2): 87–95.
- [16] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.
- [17] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 增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.
- [18] 张玉军, 黄绍敏, 李斌, 等. 长期施肥对潮土不同层次活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 160–165.
- Zhang Y J, Huang S M, Li B, et al. Effects of long-term fertilization on the labile organic carbon and carbon pool management index at different layers in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 160–165.
- [19] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- Liang Y, Han X Z, Song C, et al. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Lal R, Follett R F, Stewart B A, et al. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security[J]. *Soil Science*, 2007, 172(12): 943–956.
- [23] Tripathi N, Singh R S, Nathanael C P. Mine spoil acts as a sink of carbon dioxide in Indian dry tropical environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468–469: 1162–1171.

- [24] 张娟, 徐宁彤, 孟庆峰, 等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 107–113.
Zhang J, Xu N T, Meng Q F, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(2): 107–113.
- [25] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1523–1529.
Xu X R, Wang J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1523–1529.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(2): 300–309.
Fan T L, Wang S Y, Zhou G Y, et al. Effects of long-term fertilizer application on soil organic carbon change and fraction in cumulic haplustoll of loess plateau in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(2): 300–309.
- [29] 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.
- [30] 陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊2): 94–102.
Chen Y Q, Sui P, Yan L L, et al. Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat–maize cropping system in North China plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Supp. 2): 94–102.
- [31] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 长期不同施肥对潮土有机碳储量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1): 233–238.
Wei M, Zhang A J, Li H M, et al. Effect of different long-term fertilization on soil organic carbon storage in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1): 233–238.
- [32] Ussiri D A N, Jacinthe P A, Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed mine soils: A review[J]. *Geoderma*, 2014, 214–215: 155–167.
- [33] Yan H M, Cao M K, Liu J Y, et al. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved soil management in agricultural soils of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 325–335.
- [34] 谢钧宇, 彭博, 王仁杰, 等. 长期不同施肥对潮土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1073–1083.
Xie J Y, Peng B, Wang R J, et al. Effects of long-term different fertilizations on organic carbon fractions of macroaggregates in Anthrosol[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1073–1083.