

培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响

焦欢¹, 李廷亮^{1,2}, 高继伟¹, 李彦¹, 何冰¹, 李顺¹

(1. 山西农业大学资源与环境学院, 山西 太谷 030801;

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

摘要: 为揭示复垦土壤轻重组有机碳氮随复垦年限和培肥措施变化的特征, 采用密度分组方法研究了不施肥(CK)、单施化肥(CF)、单施有机肥(M)、有机无机配施(MCF)和生物有机肥与化肥配施(MCFB)5种培肥措施下复垦 4、8 年土壤轻重组有机碳氮含量及碳氮比变化规律。结果表明: 复垦土壤总有机碳氮与轻重组有机碳氮含量变化趋势总体均表现为随复垦年限的增加而显著提高。经过 8 年复垦, 不同处理间, 单施有机肥对总有机碳(TOC)、总有机氮(TON)、轻组有机碳(LFOC)、重组有机碳(HFOC)与轻组有机氮(LFON)、重组有机氮(HFON)的提高效果总体优于其他处理, 与生土相比, 增加幅度分别为 148.10%, 68.09%, 163.68%, 129.51%, 35.00%, 92.59%。土壤轻重组 C/N > 重组 C/N, 土壤轻重组 C/N 总体表现为随复垦年限增加而提高, 以单施化肥最高, 达 25.48; 重组 C/N 表现为随复垦年限增加而降低, 以单施化肥最低, 为 6.44。施肥对土壤碳氮库管理指数影响显著, 各施肥处理均以生物有机肥与化肥配施处理效果最好。综合来看, 在等量养分投入的情况下, 单施有机肥更有利于采煤塌陷区复垦土壤总有机碳氮库及轻重组有机碳的积累, 单施化肥更大程度促进了轻重组有机碳和重组有机氮的提升幅度。

关键词: 复垦土壤; 培肥措施; 轻重组有机碳; 轻重组有机氮

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0208-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.034

Effects of Fertilization on Light and Heavy Fractions Organic Nitrogen in Reclaimed Soil

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

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

Abstract: In order to reveal the changing characteristics of soil organic carbon and nitrogen of light and heavy fractions in reclaimed soil as affected by different reclamation years and fertilization measures, the variation of carbon and nitrogen contents and C/N ratio of light and heavy fractions were studied under five fertilization modes by the density fractionation (no-fertilizer control, CK; single fertilizer, CF; single organic manure, M; fertilizer combined organic manure, MCF; and biological organic fertilizer and chemical fertilizer mixed fertilizer, MCFB). The results showed that TOC (total organic carbon), TON (total organic nitrogen), carbon and nitrogen of light fraction and heavy fraction all increased with the increasing ages. Single organic manure showed significant increase in TOC, TON, LFOC, HFOC, LFON and HFON compared with other treatments after 8 years of reclamation, and the corresponding contents were 148.10%, 68.09%, 163.68%, 129.51%, 35.00% and 92.59% higher than those of raw soil, respectively. The sequence of C/N was Light Fraction C/N > Heavy Fraction C/N. The light fraction C/N in all treatments increased with the increasing reclamation ages, being the highest (25.48) in CF, and the heavy fraction C/N in all treatments decreased with increasing time, being the lowest (6.44) in CF. Fertilization measures had a significant effect on the management index of soil C and N stocks. Treatments of MCFB could improve CMI and NMI more effectively than other treatments. On the whole, under same nutrient inputs condition, single organic manure was more conducive to the accumulation of soil total organic carbon and nitrogen pools and carbon and nitrogen contents of light and heavy fractions in the reclaimed soil of coal mining subsidence areas. Single fertilizer promoted the increases of light fraction organic carbon and heavy fraction organic nitrogen to a greater extent.

收稿日期: 2018-04-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401342)

第一作者: 焦欢(1994—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail: ml8235477152@163.com

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

Keywords: reclaimed soil; fertilization measures; light and heavy fractions organic carbon; light and heavy fractions organic nitrogen

山西省作为煤炭资源大省,为国家能源供给作出贡献的同时,形成的采空区和土地塌陷对全省的土地资源和农业生产造成了严重破坏。调查显示,截止 2015 年,全省采煤造成的采空区面积近 50 万 hm^2 ,其中沉陷区面积达 60% 以上,造成耕地面积锐减,人地矛盾加剧。矿区土地复垦是维持耕地总量平衡、缓解人地矛盾的重要途径。矿区土壤由于采矿活动的破坏,导致土壤肥力降低、生物多样性减少及生态系统不稳定,提升土壤有机质含量是提高复垦土壤肥力的基础,也是土壤复垦领域的研究重点。根据土壤有机质存在形态的比重不同,采用密度分组法将其分离为轻组有机质与重组有机质。轻组有机质因其含有丰富的单糖、多糖、半木质素而极易被微生物分解,可快速有效地判断农业生产措施对土壤质量带来的影响^[1]。而重组有机质由于其稳定性强,对外界环境变化反应迟缓。土壤有机碳是可以被微生物利用作为土壤碳源的有机质。通过培肥^[2]、耕作经营^[3]、作物轮作^[4]和不同土地利用方式^[5]等对微生物数量及活性产生影响,从而形成轻重组有机碳组分之间的动态转化。土壤有机碳氮是土壤有机质的主要元素组成,大量研究^[6-9]表明,单施有机肥和有机无机配施可提高土壤轻组有机碳含量及其占土壤总有机碳的比例。单施有机肥同样可以提高土壤重组有机碳含量,但其与化肥配施却降低了重组有机碳含量。还有研究^[10]表明,在不同有机质含量的农田黑土上长期施用化肥可以增加土壤轻组有机氮含量。梁尧等^[11]研究表明,施化肥对轻组有机氮无明显影响,并进一步指出施有机肥可以显著增加游离态轻组有机氮含量,高量

施入有机肥可以明显提高土壤闭蓄态轻组有机氮和重组有机氮含量。总体来看,有机碳氮组分因土壤环境条件差异而对培肥措施的响应不尽相同,明确不同培肥措施对复垦土壤有机碳氮库积累特征和转化规律,研究土壤有机碳氮组分动态变化对复垦土壤培肥具有重要意义。

目前,轻重组有机碳氮在一般农田土壤上的研究为提高农田土壤肥力和固碳能力提供了科学依据,因此,对肥力贫瘠的采煤塌陷区土壤进行轻重组有机碳氮研究,为矿区复垦土壤碳氮库重建寻求依据更为必要。本文以山西省潞安洛江沟煤矿采煤塌陷区复垦土壤为研究对象,采用密度分组方法研究不同培肥措施对土壤轻重组分碳氮含量的影响,探讨复垦过程中不同培肥措施下复垦土壤轻重组分有机碳氮的变化规律,以期对矿区土壤快速培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采煤塌陷区复垦土壤长期定位试验基地位于山西省襄垣县洛江沟村(36°28′11.95″ N、113°00′52.57″ E,海拔 980 m)。土壤类型为石灰性褐土,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9 ℃,年降水量 500~600 mm,无霜期 160 d。该基地自 2009 年起,采用剥离复垦方式平整恢复耕地,种植作物为玉米,播种密度为 60 000 株/ hm^2 。目前有连续复垦 4、8 年的土壤,复垦 4 年土壤是于 2013 年起开始复垦。本研究以复垦 4、8 年土壤为研究对象,研究采煤塌陷地复垦土壤在不同培肥措施下轻重组分有机碳氮的变化规律。各复垦土壤耕层基本理化性状见表 1。

表 1 不同复垦年限耕层土壤基本理化性状

复垦 年限/a	处理	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH
4	对照(CK)	15.93	5.43	154.58	7.87	8.21
	化肥(CF)	20.06	10.24	178.96	11.02	8.12
	有机肥(M)	24.78	19.75	193.87	14.95	8.11
	有机肥+化肥(MCF)	23.01	13.78	158.64	12.90	8.12
	生物有机肥+化肥(MCFB)	24.19	18.04	147.80	13.76	8.14
8	对照(CK)	24.19	6.71	143.74	9.84	8.14
	化肥(CF)	27.73	25.17	184.38	13.21	7.98
	有机肥(M)	28.32	33.95	193.87	16.90	8.06
	有机肥+化肥(MCF)	27.14	15.48	176.26	14.12	8.06
	生物有机肥+化肥(MCFB)	34.81	25.30	173.55	14.81	8.01
	周边农田熟土(US)	33.63	11.34	223.67	31.72	8.11
	未复垦生土(RS)	24.78	2.01	101.74	6.81	8.14

1.2 试验设计

试验设置 5 个处理:(1)不施肥对照(CK);(2)单施化肥(CF);(3)单施有机肥(M);(4)有机肥+化肥

(MCF);(5)生物有机肥+化肥(MCFB)。其中供试有机肥为完全腐熟的鸡粪,含有机质 25.8%,N 1.68%, P_2O_5 1.54%, K_2O 0.82%。供试菌肥是将拉恩式菌、假单胞

菌 1、假单胞菌 2 制成混合磷细菌菌液后,与鸡粪按照 1:9 的比例混匀,其活菌数 $\geq 0.5 \times 10^8$ CFU/g。每个处理重复 3 次,采用随机区组设计。试验小区面积为 100 m²。各培肥处理总养分投入量一致,具体施肥量见表 2。试验期间一年一作种植春玉米,每年 5 月左右播种,10 月左右收获,玉米秸秆全部还田。

表 2 不同施肥处理的肥料用量

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

1.3 测定项目与方法

土壤样品于玉米播种前(2017 年 3 月 31 日)采集。采用多点混合采样法采集 0—20 cm 表层土壤,同时采集未复垦生土(RS)和周边未破坏农田熟土(US)作为复垦土壤肥力提升程度的对比标准,装入无菌袋中,带回实验室,剔除动、植物残体和石块,风干后过 2 mm 筛待测。

1.3.1 土壤总有机碳(TOC) 采用重铬酸钾容量法—外加加热法^[12]测定。土壤总有机氮(TON)采用半微量开氏法^[12]测定。

1.3.2 轻重组分的分离 称取过 2 mm 筛的风干土样 5 g 到 50 mL 的离心管中,然后加入 25 mL 1.8 g/cm³ 的溴化锌溶液,以转速 200 r/min 振荡 1 h 后,在 3 000 r/min 下离心 10 min,弃去离心管中上清液,重复以上步骤 3 次,使得轻组有机质可以完全被浸提分离。再用 95%的乙醇洗涤土壤中的溴化锌溶液,方法是以同样的转速和离心速度重复振荡离心洗涤 3 次,弃去上清液。再用蒸馏水洗去乙醇,重复振荡离心洗涤 2 次,弃去离心管中上清液。将装着土样重组部分的离心管放到 60 ℃烘箱中烘干 48 h,称重,即为重组组分。

1.3.3 轻重组有机碳测定与计算 将烘干的土壤放在研钵中磨细,过 0.149 mm 筛,采用重铬酸钾容量法—外加加热法^[12]测定土壤有机碳含量,即为重组组分有机碳。

重组有机碳(g/kg)=(重组组分有机碳含量(g/kg)×重组组分质量(g))/烘干土重(g)

轻组有机碳(g/kg)=(总有机碳含量(g/kg)×烘干土重(g)－重组组分有机碳含量(g/kg)×重组组分质量(g))/烘干土重(g)

1.3.4 轻重组有机氮的测定与计算 将烘干的土壤放到研钵中磨细,过 0.149 mm 筛,采用半微量开氏法测定土壤有机氮含量^[12],即为重组组分有机氮。

重组有机氮(g/kg)=(重组组分有机氮含量(g/

kg)×重组组分质量(g))/烘干土重(g)

轻组有机氮(g/kg)=(总有机氮含量(g/kg)×烘干土重(g)－重组组分有机氮含量(g/kg)×重组组分质量(g))/烘干土重(g)

1.3.5 碳氮库管理指数的计算 根据测定的总有机碳氮和轻重组有机碳氮含量,按照公式计算:

碳库管理指数(CMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(CI)×100

氮库管理指数(NMI)=氮库指数(NPI)×氮库活度指数(NI)×100

碳库活度(C)=轻组有机碳(LFOC)/重组有机碳(HFOC)

碳库活度指数(CI)=样品土壤碳库活度(C)/参考土壤碳库活度(C0)

碳库指数(CPI)=样品土壤总有机碳含量(g/kg)/参考土壤总有机碳含量(g/kg)

氮库活度(N)=轻组有机氮(LFON)/重组有机氮(HFON)

氮库活度指数(NI)=样品土壤氮库活度(N)/参考土壤氮库活度(N0)

氮库指数(NPI)=样品土壤总有机氮含量(g/kg)/参考土壤总有机氮含量(g/kg)

试验分别以未复垦生土作为参考土壤,计算 CMI 和 NMI。

1.4 数据处理与统计分析

所有数据采用 Excel 2003 软件进行统计运算和整理,不同处理之间的差异显著性用 SPSS 19.0 软件进行分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对复垦土壤总有机碳氮的影响

土壤 TOC 含量随复垦年限增加而显著增加(表 3),复垦 8 年土壤各培肥处理平均 TOC 含量较复垦 4 年土壤增加了 13.82%($P<0.05$),较未复垦生土提高了 1.02 倍,但仍低于周边农田熟土有机碳水平。复垦 4、8 年土壤下,单施有机肥较其他处理均显著提高土壤 TOC 含量,MCF 和 MCFB 处理下土壤 TOC 含量无显著差异,但高于 CF 处理。复垦土壤 TON 含量变化亦表现为随复垦年限增加而增加,复垦 8 年土壤下各处理平均 TON 含量较复垦 4 年土壤和生土分别提高 20.00%($P<0.05$)和 53.19%($P<0.05$)。同一复垦年限不同施肥处理间以单施有机肥处理 TON 含量最高,但与 MCF 和 MCFB 处理无显著差异。同时由表 3 可知,经过 8 年复垦,不施肥对照处理土壤 TOC 和 TON 含量较未复垦生土高 44.56%和 21.28%,可能是由于长期秸秆还田增加了有机碳和氮源。

表 3 不同培肥措施下复垦土壤总有机碳氮含量变化			
单位:g/kg			
复垦年限/a	施肥处理	TOC	TON
4	CK	4.56±0.15d	0.45±0.05c
	CF	6.39±0.22c	0.55±0.03bc
	M	8.67±0.53a	0.72±0.08a
	MCF	7.48±0.16b	0.65±0.08ab
	MCFB	7.98±0.25b	0.63±0.01ab
8	CK	5.71±0.43c	0.57±0.01b
	CF	7.66±0.40b	0.72±0.04a
	M	9.80±0.74a	0.79±0.06a
	MCF	8.19±0.05b	0.77±0.06a
	MCFB	8.59±0.42b	0.74±0.04a
平均值(4 a)		7.02±0.17c	0.60±0.02c
平均值(8 a)		7.99±0.14b	0.72±0.01b
US		18.40±0.53a	1.12±0.06a
RS		3.95±0.17d	0.47±0.08d

注:平均值(4 a)、平均值(8 a)分别表示 4,8 年复垦土壤各培肥处理的平均值;表中数据形式为均值±标准误差;同列同年份数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);平均值(4 a)、平均值(8 a)、US、RS 对应数据后不同小写字母亦表示 $P=0.05$ 水平上的差异性。下同。

2.2 不同培肥措施对土壤轻重组有机碳的影响

由表 4 可知,经过 8 年复垦,LFOC 和 HFOC 含量分别占总碳 45.96%~62.51%和 37.49%~54.04%。复垦土壤 LFOC 与 HFOC 含量总体随复垦年限增加而增加,复垦 8 年土壤各处理平均 LFOC 和 HFOC 含量分别较 4 年高 22.89%($P<0.05$)和 3.88%,较 RS 高 112.74%($P<0.05$)和 90.16%($P<0.05$),但较 US 低 66.62%($P<0.05$)和 28.83%($P<0.05$)。复垦 4,8 年土壤下,各施肥处理较不施肥对照处理均显著提高了土壤 LFOC 含量,其中以 MCFB 和 M 处理 LFOC 含量最高,但差异不显著,平均值分别为 4.71,5.48 g/kg;同时单施有机肥处理较其他处理显著提高了复垦土壤 HFOC 含量,分别为 3.97,4.20 g/kg。总体来看,生物有机肥与化肥配施和单施有机肥处理更大程度上提高了 LFOC 含量,单施有机肥处理很大程度提高 HFOC 含量。

表 4 不同培肥措施下复垦土壤轻重组有机碳含量变化			
单位:g/kg			
复垦年限/a	施肥处理	轻组有机碳	重组有机碳
4	CK	1.76±0.12d	2.80±0.23c
	CF	3.17±0.20c	3.22±0.01b
	M	4.70±0.62a	3.97±0.10a
	MCF	4.01±0.21b	3.48±0.16b
	MCFB	4.72±0.22a	3.26±0.19b
8	CK	2.62±0.46c	3.08±0.05c
	CF	4.26±0.44b	3.40±0.07b
	M	5.59±0.78a	4.20±0.06a
	MCF	4.69±0.12ab	3.49±0.07b
	MCFB	5.37±0.42a	3.22±0.12c
平均值(4 a)		3.67±0.13c	3.35±0.05b
平均值(8 a)		4.51±0.15b	3.48±0.03b
US		13.51±0.55a	4.89±0.07a
RS		2.12±0.08d	1.83±0.10c

2.3 不同培肥措施对土壤轻重组有机氮的影响

复垦土壤轻重组有机氮含量随复垦年限增加而增加,复垦 4 年土壤各培肥处理 LFON 和 HFON 含量平均值较 RS 分别高 10.00%和 40.74%($P<0.05$),复垦 8 年土壤平均 LFON 和 HFON 含量分别较复垦 4 年高 13.64%和 23.68%($P<0.05$),但较周边熟土分别低 50.98%($P<0.05$)和 24.19%($P<0.05$)(图 1)。LFON 含量总体低于 HFON 含量,经过 8 年复垦,HFON 含量占总有机氮 58.90%~73.61%,表明 HFON 是土壤有机氮的主要组成。复垦 4 年土壤,M、MCF、MCFB 处理间 LFON 含量差异不显著,平均为 0.27 g/kg,较 CF 处理高 107.69%($P<0.05$);HFON 含量则以 CF 与 M 处理最高,平均为 0.44 g/kg,显著高于其他处理。复垦 8 年土壤,LFON 含量以 MCFB 和 MCF 处理最高,处理间差异不显著,平均值为 0.30 g/kg,但显著高于 CF、CK 处理;HFON 含量变化趋势与复垦 4 年土壤基本一致,表现为 $CF>M>MCF>MCFB>CK$ 。

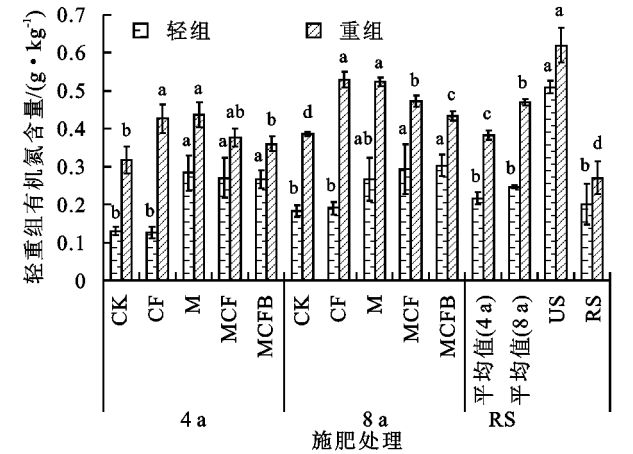


图 1 不同培肥措施下复垦土壤轻重组有机氮含量变化

2.4 培肥措施对土壤各密度组分碳氮比及碳氮库管理指数的影响

土壤轻组组分 C/N 总体随复垦年限增加而增加,复垦 8 年土壤各处理平均轻组组分 C/N 较复垦 4 年土壤高 4.85%(表 5)。土壤重组组分 C/N 随复垦年限增加而减少,复垦 8 年土壤各处理平均重组组分 C/N 较复垦 4 年土壤降低 14.95%。复垦土壤轻组组分 C/N 明显高于重组组分 C/N。复垦 4,8 年土壤轻组组分 C/N 均以 CF 处理最高,重组组分 C/N 均以 CF 处理最低,其他处理之间总体差异不显著。各培肥处理轻组组分 C/N 较生土高 19.50%~128.93%,较熟土低 3.99%~49.89%。各培肥处理重组组分 C/N 与未复垦生土和周边农田熟土没有明显差异。碳库管理指数(CMI)和氮库管理指数(NMI)均表现为 $US>平均值(8 年)>平均值(4 年)>RS$ 。复垦 4,8 年土壤下,各培肥处理间 CMI 均以 MCFB 处理最高,分别达 254.12 和 316.01,且显著高于 CF 处理;

M、MCFB 和 MCF 处理间 NMI 差异不显著,平均值 分别为 136.16 和 135.96,显著高于其他处理。

表 5 不同培肥措施下复垦土壤各密度组分碳氮比及管理指数

复垦 年限/a	施肥 处理	轻组组分碳氮比 (LFOC/LFON)	重组组分碳氮比 (HFOC/HFON)	碳库管理指数 (CMI)	氮库管理指数 (NMI)
4	CK	13.30±1.62b	8.83±0.45a	63.59±7.38d	55.27±5.50b
	CF	25.48±4.86a	7.58±0.60b	138.29±12.86c	47.90±7.94b
	M	16.93±3.93b	9.08±0.60a	227.51±48.71ab	136.28±27.82a
	MCF	15.29±3.61b	9.26±0.20a	189.66±17.94b	135.39±32.78a
	MCFB	17.62±0.91b	9.06±0.19a	254.12±21.40a	136.81±17.84a
	CK	14.49±3.63b	7.97±0.26 ab	107.80±26.87c	78.92±9.35b
8	CF	22.55±3.23a	6.44±0.40d	212.25±35.44b	75.25±7.49b
	M	21.41±4.41ab	8.08±0.09a	288.54±65.38ab	118.20±31.45ab
	MCF	16.72±4.61ab	7.37±0.35c	241.78±12.73ab	139.95±43.81a
	MCFB	17.77±0.81ab	7.40±0.34bc	316.01±42.88a	149.72±20.34a
平均值(4 a)		17.72±1.46b	8.76±0.08a	174.63±9.92bc	102.33±11.20b
平均值(8 a)		18.58±1.07b	7.45±0.15ab	233.27±8.27b	112.41±7.21b
US		26.54±1.99a	7.91±0.55ab	1117.00±86.31a	270.19±5.52a
RS		11.13±2.99c	6.90±1.21b	100.00c	100.00b

3 讨论

施用有机肥在改善土壤结构,提高作物产量方面具有重要作用^[13]。一般农田土腐熟的农家肥施用量在20 000~45 000 kg/hm²^[9,14-17],商品有机肥在1 500~5 000 kg/hm²^[18-22],采煤塌陷区新复垦土壤培肥的商品有机肥用量在3 000~45 000 kg/hm²^[23]。本研究中,没有设置不同有机肥用量的试验,着重进行等养分量不同肥源的培肥效果分析,本试验有机肥源为腐熟的鸡粪,接近商品有机肥养分标准^[24],综合考虑设置的单施有机肥用量为12 000 kg/hm²,配施用量为6 000 kg/hm²。

研究表明,单施有机肥、有机无机配施和生物有机肥与化肥配施处理均可以显著提高复垦土壤 TOC 含量,一方面是因为有机肥本身作为一种碳源,对土壤总有机碳含量有一定贡献;另一方面是由于有机肥促进了作物生长,提高了作物的残茬和根系还田量,经过微生物转化为土壤有机质^[25-26]。在本研究中,随复垦年限的增长,各处理间土壤 TON 含量均在不同程度上得以提高,不同复垦年限下均以单施有机肥处理最高,有机肥化肥配施次之,这与宋震震等^[27]的研究结果相同,有机肥中包含大量的含氮物质,这是导致施有机肥土壤全氮增加的原因。实际上土壤中95%以上的氮素是有机氮,因此土壤全氮具有与土壤总有机碳基本一致的变化规律。

在本研究中,单施有机肥可同时提高复垦土壤轻组组分以及重组组分有机碳氮的含量,原因是有机肥施入会改善土壤微生态环境,提高微生物活性,进而促进土壤有机组分的活化。相对贫瘠的复垦土壤重组组分增加的原因更大程度上是有机肥的施入本身带入的稳定性有机物质。梁尧等^[11]在东北黑土的研究表明,施入高量有机肥可以促进土壤中各密度

组分中有机碳、氮的形成和积累,但更有利于土壤中胡敏酸和胡敏素的积累,从而提高土壤有机质的腐殖化程度,增强了土壤有机质的稳定性。已有研究^[2,11]表明,重组有机质是土壤有机质的主体部分,在紫色水稻土地区,重组有机碳在总有机碳中的比例可达81.9%^[28],但在本研究结果中总体表现为轻组有机碳的含量高于重组有机碳,8年复垦土壤下重组有机碳在总有机碳中所占的比例仅占37.49%~54.04%,这与土壤肥力水平有关,在肥力相对偏低的复垦土壤区,一方面重组组分有机碳库易向轻组组分有机碳库转化,供土壤微生物及作物生长利用;另一方面还田的秸秆、残茬及根系也会被微生物分解首先转化并维持在轻组有机碳库。

已有研究^[11,25,29]表明,土壤不同组分 C/N 变化趋势为轻组组分>重组组分,这是因为轻组的成分主要是来自土壤中未分解和正在分解的动植物残留物、糖类和半木质素等物质,它具有相对较高的碳氮比,重组中包括分解程度更高的土壤腐殖质,碳氮比较低^[30]。在本研究中,复垦土壤 C/N 也遵循这一变化趋势,并且本研究单施化肥较 CK 处理提高了土壤轻组组分 C/N,降低了重组组分 C/N,增施有机肥较 CF 处理提高了重组组分 C/N,降低了土壤轻组组分 C/N。表明单施化肥可以加快重组组分碳的矿化,促进重组组分有机碳向轻组组分的周转速度,进而维持了相对高水平的轻组组分含量,而且轻组组分中的一些秸秆和根系半分解产物具有比较高的 C/N,因此总体提高了复垦土壤轻组组分的 C/N。而增施有机肥却加快了轻组组分的分解及向重组组分的转化,进而降低了轻组组分的 C/N,提高了重组组分的 C/N。

土壤碳氮库管理指数可以有效反映外界管理措施对土壤有机碳氮总量的影响和土壤有机碳氮组分的变化情况^[31]。张贵龙等^[32]研究表明,施有机肥或

有机无机配施对于提高土壤碳库指数和碳库管理指数较化肥单施更具积极意义。王改玲等^[33]对渭北旱塬区的研究也表明这一点,这与本试验研究结果一致。在本研究中,MCFB处理CMI最高,这是因为菌肥的添加能够促进作物以及作物根系的生长,使土壤中的根系分泌物和有机残体数量增多,从而增加土壤中微生物的数量和活性,进而增加土壤轻组有机碳的含量,使土壤CMI也相应提高。关于土壤氮库管理指数方面的研究鲜少有人提及,在本试验条件下,复垦4、8年土壤,各有机肥处理的土壤氮库管理指数均显著高于不施肥与单施化肥处理,说明施用有机肥是提高土壤LFON含量的有效手段;而单施化肥与不施肥处理NMI均低于参考土壤,不利于土壤活性氮的提高。

4 结论

采煤塌陷区土壤总有机碳氮与轻重组有机碳氮含量总体随复垦年限增加而增加。不同培肥措施间土壤总有机碳氮变化大致表现为单施有机肥>生物有机肥与化肥配施>有机无机配施>单施化肥>对照处理。经过8年复垦,土壤各处理平均LFOC、HFOC、LFON和HFON含量分别较4年提高了22.89% ($P<0.05$), 3.88%, 13.64%, 23.68% ($P<0.05$)。单施有机肥或配施有机肥一定程度上均可提高土壤轻组有机碳氮和重组有机碳氮的含量。土壤轻组组分C/N高于重组组分,轻组组分C/N总体表现为随复垦年限增加而提高,以单施化肥最高;重组组分C/N表现为随复垦年限增加而降低,以单施化肥最低。施肥对土壤碳氮库管理指数影响显著,各施肥处理以生物有机肥与化肥配施效果最好。总体来看,施肥对改善矿区土壤肥力,提升矿区土壤轻重组有机碳氮含量有明显作用,其中,单施有机肥对复垦土壤的轻重组有机碳氮影响最大。

参考文献:

- [1] 武天云, Jeff J S, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717-722.
- [2] 尹云锋, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分的有机质的动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 875-878.
- [3] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 70: 107-119.
- [4] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [5] Liu X, Li F M, Liu D Q, et al. Soil organic carbon, carbon fractions and nutrients as affected by land use in Semi-arid region of Loess Plateau of China [J]. Pedosphere, 2010, 20(2): 146-152.
- [6] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 129-138.
- [7] 仪明媛. 长期施肥下黑土碳库变化及土壤有机碳矿化特征[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
- [8] 李清华. 长期施肥对红壤水稻土碳、氮组分及微生物多样性的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [9] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1223-1228.
- [10] 郑利远, 陈一民, 焦晓光, 等. 长期施肥对不同有机质含量农田黑土活性有机氮组分的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(5): 96-100.
- [11] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 174-178.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-47.
- [13] 黄晶, 高菊生, 张杨珠, 等. 长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1889-1894.
- [14] 张士义, 刘慧颖. 辽西北半干旱地区有机肥对玉米产量及水分利用的影响[J]. 杂粮作物, 2001, 21(5): 44-45.
- [15] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792-2798.
- [16] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 326-335.
- [17] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
- [18] 冯超, 彭炼波, 应国勇, 等. 2017年早稻商品有机肥不同施用量对比试验研究[J]. 江西农业, 2018(8): 17.
- [19] 杨淑霞. 商品有机肥不同施用量对玉米产量的影响[J]. 青海农林科技, 2016(4): 80-82.
- [20] 屈佳君, 马自波, 李荣, 等. 水稻施用商品有机肥效果研究[J]. 现代农业科技, 2015(2): 15-16, 18.
- [21] 刘家龙, 李秀玲, 翁德强, 等. 有机肥与化肥结合施用对水稻的增产作用[J]. 上海农业学报, 2009, 25(2): 115-118.
- [22] 苏瑞芳, 李秀玲, 张婉英, 等. 商品有机肥对水稻生长、产量及稻米品质影响[J]. 上海农业学报, 2008, 24(4): 127-130.
- [23] 山西省质量技术监督局. DB14/T 922—2014 采煤沉陷区新复垦土壤快速培肥技术规程[S]. 太原: 山西省质量技术监督局, 2014: 3.
- [24] 中华人民共和国农业部. NY 525—2002 有机肥料标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
- [25] 芦思佳, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 施肥对黑土密度分组中碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 177-180.

- and conservation tillage: Influence on seasonal runoff, sediment, and nutrient losses in the Canadian Prairies [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(3): 964-80.
- [5] Mannering J V, Fenster C R. What is conservation tillage? [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(3): 140-143.
- [6] Uri N D. Conservation practices in US agriculture and their implication for global climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 256(1): 23-38.
- [7] Afzalnia S, Ziaee A R. Effect of conservation tillage and irrigation methods on the cotton yield and water use efficiency [J]. *Acta Horticulturae*, 2014, 1054: 119-126.
- [8] Huang G B, Zhang R Z, Li L L. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 43-55.
- [9] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 112-117.
- [10] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1362-1368.
- [11] 郭清毅, 黄高宝, Li G D, 等. 保护性耕作对旱地麦—豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 165-169.
- [12] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326-2332.
- [13] 陈亮亮, 黄高宝, 李玲玲, 等. 不同耕作措施对小麦水分利用的影响及机制[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(1): 48-53.
- [14] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 61-69.
- [15] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [16] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. *水利学报*, 1998(10): 36-39.
- [17] Huang G B, Chai Q, Feng F X, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid northwest China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(8): 1286-1296.
- [18] 冯福学, 黄高宝, 于爱忠, 等. 不同保护性耕作措施对武威绿洲灌区冬小麦水分利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1060-1065.
- [19] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析: 保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1914-1924.
- [20] 高亚军, 李生秀. 秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 15-19.
- [21] 王晓娟, 黄高宝, 李卿沛, 等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 172-177.
- [22] 李静静, 李从锋, 李连禄, 等. 苗带深松条件下秸秆覆盖对春玉米土壤水温及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1787-1796.
- [23] 黄高宝, 李玲玲, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 1-4, 19.
- [24] 练宏斌. 不同耕作措施对旱地春小麦光合生理生态特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [25] 刘贤赵. 土壤水分与遮阴对作物水分利用的影响机理与效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- (上接第213页)
- [26] 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(7): 1826-1833.
- [27] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525-533.
- [28] 赵亚南. 长期不同施肥下紫色水稻土有机碳变化特征及影响机制[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [29] 李海波, 韩晓增, 王凤, 等. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 112-119.
- [30] 顾鑫, 杨丽, 任翠梅, 等. 土壤有机碳物理组分研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2017(6): 120-124.
- [31] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [32] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 359-365.
- [33] 王改玲, 李立科, 郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 20-26.