

不同利用方式下复垦土壤的有机碳组分空间分布特征

李奇超^{1,2}, 李新举^{1,2}

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学资环学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 以济宁市粉煤灰充填复垦中的园地、耕地和林地为研究对象, 研究不同利用方式对复垦土壤的有机碳组分空间分布的影响。通过现场分层采集土样和室内化验指标, 研究有机碳组分(WDOC、POC、MOC、LFOC、HFOC、MBC)在不同利用方式土壤中的空间分布特征。结果表明: (1) 3种利用方式的全碳(TC)、土壤有机碳(SOC)和土壤有机碳密度(SOCD)均低于对照耕地。不同利用方式之间 TC、SOC 和 SOCD 的大小关系均为复垦园地>复垦林地>复垦耕地。(2) 不同利用方式之间有机碳组分差异明显($P<0.05$), SOC 与各组分之间均表现为极显著正相关, 且关系密切。通过对组分进行相关性分析、比重分析和敏感性分析发现, MOC 和 HFOC 的含量偏低是导致复垦土壤有机碳低于对照耕地的根本原因。(3) 根据有机碳组分丰富度指数发现, 复垦园地的组分在 0—40 cm 土层恢复较好, 复垦林地在 40—60 cm 土层恢复较好, 复垦耕地恢复效果一般。在 0—60 cm 土层的综合指数上表现为复垦园地>复垦林地>复垦耕地。通过对 3 种利用方式的有机碳组分空间分布特征进行分析后发现, 在济宁市平阳寺镇的粉煤灰充填复垦地中, 利用成园地效果最好, 值得进一步推广。

关键词: 充填复垦; 利用方式; 有机碳组分; 空间分布

中图分类号: TD88; S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0204-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.030

The Spatial Distribution of Organic Carbon Components in Reclaimed Soil Under Different Utilization Modes

LI Qichao^{1,2}, LI Xinju^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018; 2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Taking the reclaimed soil backfilled with coal ash in the Ji'ning region as the research objects, the spatial distribution characteristics of organic carbon components (WDOC, POC, MOC, LFOC, HFOC, MBC) in the reclaimed soil under three different utilization modes: garden land, cultivated land and forest land. The results showed that: (1) The total carbon (TC), soil organic carbon (SOC) and soil organic carbon density (SOCD) of the three different utilization modes were lower than the control. The sizes of TC, SOC and SOCD in different utilization modes: garden land>forest land>cultivated land. (2) The difference of organic carbon components between different utilization modes was significant ($P<0.05$), there were significant positive correlations between the organic carbon and other components. By correlation analysis, specific gravity analysis and sensitivity analysis, the lower contents of MOC and HFOC resulted in the lower soil organic carbon in reclaimed soil than the control. (3) According to the organic carbon component enrichment index, the composition of the garden was recovered well in the 0—40 cm soil layer, the forest land recovered well in 40—60 cm, but not so much for the recovery in cultivated land. For the composite index of 0—60 cm soil layer, it turned out that garden land>forest land>cultivated land. In a word, through analyzing the organic carbon composition, the best utilization mode is garden land, which is worth further promotion.

Keywords: filling reclamation; utilization mode; organic carbon component; spatial distribution

采煤塌陷地治理后土地质量的监测问题一直是社会关注的热点问题,土壤有机碳作为衡量土地质量的重要指标^[1],其在复垦后的变化情况逐渐成为学术界研究的热点。近年来国内外学者从复垦年限、地形因素、土层深度、利用方式、农业管理措施^[2-6]等角度对土壤有机碳的变化情况进行监测。由于有机碳组分对复垦等管理措施造成的土壤变化非常敏感,因而可以用来反映土壤质量的变化。但是当前对高潜水位煤矿区复垦地中的有机碳组分变化的研究不多,尤其是对不同利用方式下复垦土壤的有机碳组分空间分布情况的研究更少。

当前专家学者对土壤有机碳组分研究取得重大成果。Sharma等^[7]通过研究土壤理化性质与土壤有机碳组分的关系,发现与土壤固有性质相比,土地利用方式对土壤有机碳和组分的影响更大;陈高起等^[8]研究发现不同土地利用方式下有机碳各组分含量在垂直分布上均呈现出随土壤深度的增加而降低的趋势,不同土地利用方式之间的差异较大;杨长明等^[9]研究发现把耕地转为林地会提高土壤总有机碳和土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳和水溶性有机碳的含量和分配比例;王胜楠等^[10]研究发现耕地经秸秆还田处理后土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳、轻组有机碳等含量均随土层深度的增加呈先增加后降低趋势,各组分含量与土壤有机碳呈正相关关系;余健^[11]通过采用土壤碳的分离测定方法来划分有机碳组分,得出有机碳从质量上约等于“溶解性有机碳+颗粒有机碳+矿物结合态有机碳”或“溶解性有机碳+轻组有机碳+重组有机碳”的结论。

以余健^[11]提出的有机碳组分的划分理论为基础,结合其他学者对有机碳组分的早期研究,本文研究的有机碳组分包括:溶解性有机碳(WDOC)、颗粒有机碳(POC)、矿物结合态有机碳(MOC)、轻组有机碳(LPOC)、重组有机碳(HPOC)和微生物量碳(MBC)。主要通过对不同利用方式下复垦土壤的有机碳及组分空间特征进行分析,探讨不同利用方式对复垦土壤的有机碳及组分的影响,筛选合适的利用方式,为矿区塌陷地治理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于邹城市平阳寺镇,是济宁市重要的煤炭产地,年产原煤1 500余万t。截止到2015年底,济宁市采煤塌陷地总面积51 104 hm²,平阳寺镇所在的邹城市塌陷地总量达8 620 hm²。目前,平阳寺已对部分采煤塌陷地进行综合治理,采用的典型复垦模式是粉煤灰充填复垦。粉煤灰充填^[12]是用粉煤灰作为填充物进行充填复垦塌陷地的复垦措施,具体做法

为:把粉煤灰掺上70%的水用管道直接充填到塌陷地,待充填到一定标高后,上覆一定厚度的表土直接用于农业生产。复垦后土地利用用途多样,主要以园地和林地为主,也有部分用作耕地。

1.2 样品采集与处理

2017年7月选择复垦年限相当的耕地、林地和园地3个样区。每个样区均匀设置5~10个取样点,每个取样点分层(0—20, 20—40, 40—60 cm)取样,并以周边正常耕地为对照。现场采用SC900数显式土壤紧实度仪观测土壤压实度数据,用PC-2R多通道土壤热性质记录仪土壤热导率和土壤温度数据。

土样测定:土壤含水率采用烘干法测定;砾石体积比采用过筛法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤全碳、土壤有机碳、轻组有机碳、重组有机碳、颗粒态有机碳经过不同预处理^[13-16]后采用CNHS元素分析仪测定;土壤微生物量碳经过预处理^[17]后采用重铬酸钾氧化法测定;溶解性有机碳经过预处理^[11]后用TOC仪测定;矿物结合态有机碳采用烘干法^[11]测定。土壤有机碳密度(kg/m²)采用公式(1)算出。

$$\text{SOC}_D = \sum_{i=1}^n T_i \times D_i \times \text{SOC}_i \times (1 - C_i) / 100 \quad (1)$$

式中: T_i 为*i*层土壤的厚度(cm); D_i 为*i*层土壤的容重(g/cm³); SOC_i 为*i*层土壤的有机碳含量(g/kg); C_i 为*i*层土壤>2 mm的砾石所占的体积百分比(%)。

1.3 研究方法

在土壤试验过程中,每个样点每个指标均重复3次,取3次的平均值以减少误差。在某一样区中,采用所有样点的同一个指标的均值,设为该样区中该指标的数值。运用SPSS 17.0软件对数据进行LSD检验,以比较数据间的差异性是否显著。在数据分析中,首先分析不同利用方式的复垦土壤在0—60 cm土层的基本理化性质;然后分析不同利用方式的土壤有机碳组分在0—60 cm土层的均值及分层(0—20, 20—40, 40—60 cm)变化特征以及对有机碳组分进行相关性分析,探究组分间关系的密切程度;最后对有机碳组分运用比重分析、组分丰富度分析及敏感性分析,进而从有机碳组分的角度分析有机碳变化的内在原因以及对3种复垦土壤中有机碳组分的恢复效果进行比较。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式的土壤理化性质特征

从表1可以看出,复垦土壤与对照耕地在基本理化性质上具有较大差异。复垦土壤的压实度与对照耕地相比明显偏高,热导率略小于对照耕地,土壤温度略高于对照耕地,砾石比明显高于对照耕地,土壤容重明显高于对照耕地,而含水率大致相当。

在 SOC 含量方面,复垦地中的园地 SOC 含量最高,林地其次,耕地最低,三者之间差异显著($P<0.05$)。复垦土壤的 SOC 含量均低于对照耕地,园地、耕地和林地分别比对照耕地小 42%,68.6%和 54.0%;在

SOCD 方面,复垦地中的园地的 SOCD 最高,林地其次,耕地最低,三者之间差异显著($P<0.05$)。复垦土壤的 SOCD 均低于对照耕地,园地、耕地和林地分别比对照耕地小 35.0%,62.8%和 54.0%。

表 1 不同利用方式的土壤基本理化性质

利用方式	压实度/ kPa	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	土温/ $^{\circ}\text{C}$	含水率/ %	砾石比/ %	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SOCd/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
复垦园地	1552a	1.48b	24.98a	0.13d	0.12a	1.54a	4.87b	3.79b
复垦耕地	1417b	1.47b	25.22a	0.18a	0.07c	1.46b	2.64d	2.17d
复垦林地	1092c	1.20c	23.62b	0.15c	0.11b	1.28c	3.86c	2.60c
对照耕地	844d	1.55a	23.04c	0.16b	0.04d	1.21d	8.40a	5.83a

注:表中不同字母表示差异明显($P<0.05$)。下同。

2.2 不同利用方式的土壤有机碳组分变化特征

2.2.1 土壤有机碳组分在 0—60 cm 土层变化特征 根据表 2 和图 1 可知,不同利用方式复垦土壤的全碳含量在 5.04~10.75 g/kg 之间,三者间含量差异明显($P<0.05$),且均显著低于对照耕地。其中园地的全碳含量最大,林地其次,耕地最小。在有机碳占全碳的占比上,复垦土壤的有机碳占比均小于对照耕地,说明复垦后的土壤有机碳占比会下降,无机碳占比会升高。

在有机碳组分方面,复垦园地的 WDOC、LFOC、MBC 显著高于对照耕地,POC 含量与对照耕地相当,MOC 和 HFOC 的含量显著低于对照耕地。复垦林地的 WDOC 和 MBC 含量明显大于对照耕地,LFOC 的含量与对照耕地相当,POC、MOC 和 HFOC 的含量则明显小于对照耕地。复垦耕地的 WDOC、POC、MOC、LFOC、HFOC 和 MBC 均显著小于对照耕地。

表 2 不同利用方式的土壤有机碳组分

利用方式	全碳含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳 占比/%	有机碳组分/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
			WDOC	POC	MOC	LFOC	HFOC	MBC
复垦园地	10.75b	45.37	0.379b	1.396a	3.127b	0.688a	3.794b	0.081a
复垦耕地	5.04d	52.71	0.242d	0.766c	1.612d	0.349c	2.130d	0.036d
复垦林地	6.68c	57.71	0.405a	1.043b	2.479c	0.580b	2.880c	0.052b
对照耕地	12.63a	66.53	0.338c	1.389a	6.801a	0.589b	7.501a	0.042c

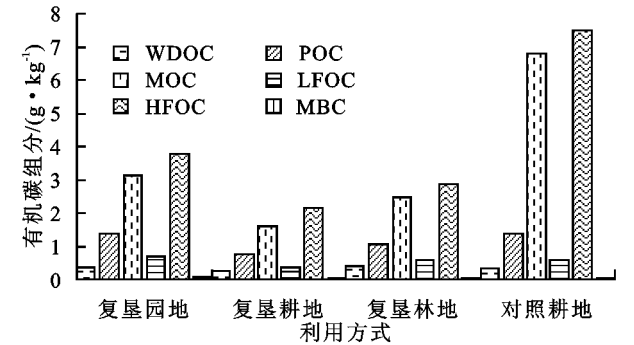


图 1 不同利用方式下土壤有机碳组分含量

2.2.2 土壤有机碳组分在不同土层间变化特征 由表 3 和图 2 可知,土壤有机碳组分在不同土层间分布特征不同。在复垦园地,全碳含量和有机碳组分含量在表层集聚,随着土层深度逐渐显著降低($P<0.05$),有机碳占比则随土层深度而加大。在 0—20 cm 土层中,WDOC、POC、LFOC、MBC 的含量均显著大于对照耕地,MOC 和 HFOC 则显著小于对照耕地;在 20—60 cm 土层中,除 MBC 的含量较高外,其他组分均显著小于对照耕地。

在复垦耕地中,TC、WDOC、LFOC 随着土层深度显著减小,POC、MOC 和 MBC 随土层深度呈现先减少后稳定的趋势,有机碳占比和 HFOC 呈现先减

小后增加的趋势。除 MBC 的含量在 0—20 cm 和 40—60 cm 土层与对照耕地含量相当外,其他有机碳组分在 0—60 cm 土层间均小于对照耕地。

在复垦林地中,TC、有机碳占比、MOC、LFOC、HFOC 和 MBC 随土层深度呈先减少后增加的趋势。在 0—20 cm 土层中,WDOC、LFOC 和 MBC 的含量与对照耕地相当,其他组分均小于对照耕地;在 20—40 cm 土层中,WDOC 含量显著大于对照耕地,MBC 含量与对照耕地相当,其他组分均小于对照耕地;在 40—60 cm 土层中,WDOC、POC、LFOC、MBC 的含量显著大于对照耕地,MOC 和 HFOC 含量则显著小于对照耕地。

2.2.3 不同利用方式的土壤有机碳组分相关性分析 从表 4 可以看出,通过对有机碳及组分进行相关性分析,发现 SOC 与所有组分均存在极显著性正相关($P<0.01$),说明 SOC 与组分之间存在密切关系。其中,SOC 与 MOC 和 HFOC 相关系数为 $R_1=0.928$ ($P<0.01$)和 $R_2=0.885$ ($P<0.01$),说明 MOC 和 HFOC 的含量对 SOC 的含量影响较大;LFOC 和 HFOC 相关系数为 $R_3=0.805$ ($P<0.01$),说明轻重组有机碳之间相互影响较大。

表 3 不同利用方式的土壤在不同深度的有机碳组分

利用方式	土层深度/cm	全碳含量/ (g·kg ⁻¹)	有机碳 占比/%	有机碳组分/(g·kg ⁻¹)					
				WDOC	POC	MOC	LFOC	HFOC	MBC
复垦园地	0—20	19.39a	41.47	0.751a	2.428a	4.904d	1.262a	6.076d	0.146a
	20—40	8.74e	42.95	0.257e	1.040de	2.476f	0.495de	3.050f	0.059bc
	40—60	4.11k	68.68	0.128h	0.719f	2.001g	0.308f	2.257h	0.038d
复垦耕地	0—20	6.89g	53.97	0.444c	1.110d	2.146g	0.542cd	2.964f	0.052c
	20—40	4.55j	45.45	0.184g	0.643fg	1.324i	0.270g	1.647k	0.028e
	40—60	3.69l	58.16	0.097i	0.544g	1.367i	0.233h	1.778j	0.029e
复垦林地	0—20	6.35h	59.59	0.498b	0.998e	2.345fg	0.738b	2.751g	0.050c
	20—40	5.59i	52.97	0.446c	0.907e	1.686h	0.478e	2.046i	0.041d
	40—60	8.11f	59.51	0.273e	1.224c	3.408e	0.524d	3.843e	0.064b
对照耕地	0—20	14.45b	65.16	0.491b	1.797b	7.610a	0.714b	8.225a	0.052c
	20—40	12.34c	69.38	0.311d	1.268c	6.950b	0.570c	7.741b	0.041d
	40—60	11.10d	65.24	0.211f	1.102de	5.842c	0.482e	6.537c	0.034de

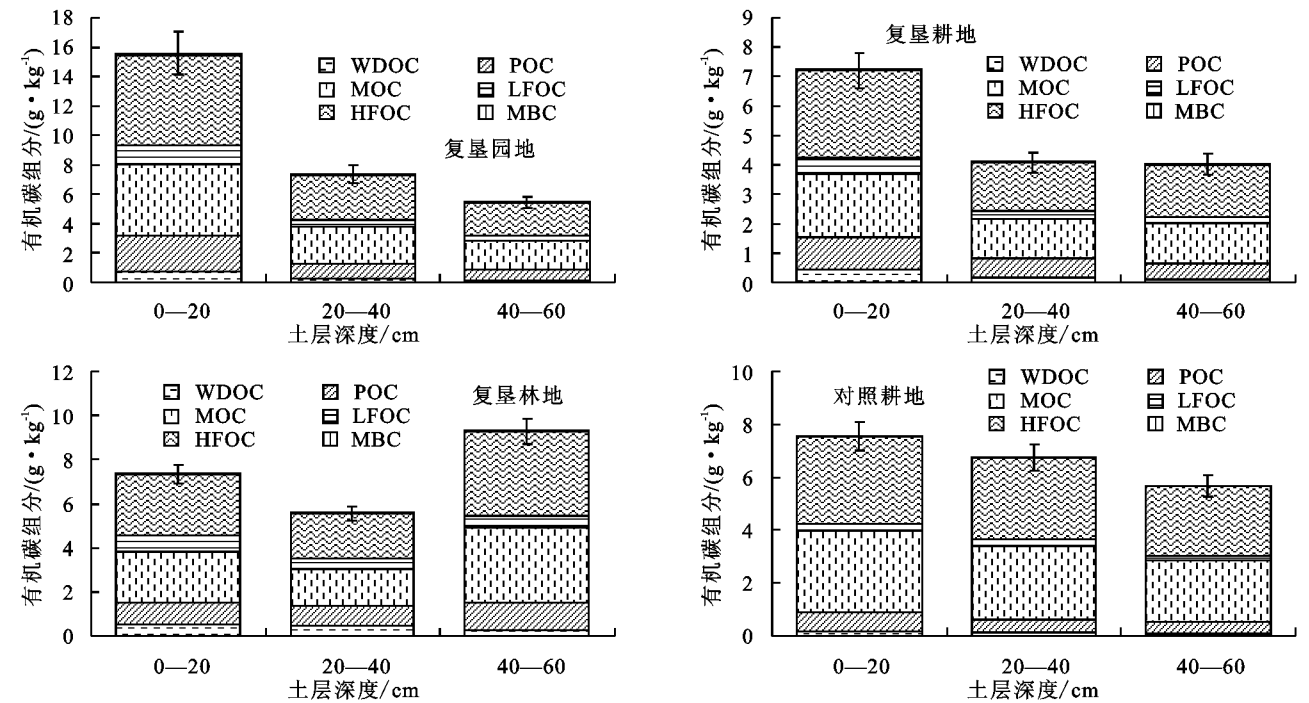


图 2 不同土层深度下复垦土壤有机碳组分含量

表 4 土壤有机碳组分相关性分析

有机碳组分	SOC	WDOC	POC	MOC	LFOC	HFOC	MBC
SOC	1						
WDOC	0.424**	1					
POC	0.502**	0.381**	1				
MOC	0.928**	0.334**	0.185	1			
LFOC	0.448**	-0.185	0.519**	0.473**	1		
HFOC	0.885**	-0.196	0.104	0.146	0.805**	1	
MBC	0.393**	0.577**	0.120	0.127	0.344**	0.142	1

注: ** 表示在 0.01 的水平上呈极显著性相关。

2.3 有机碳组分分析

2.3.1 土壤有机碳组分比重分析 从图 3 可以看出,复垦后的土壤有机碳组分与对照耕地相比有较大的差异。复垦土壤的 WDOC、POC 和 LFOC 的比重比对照耕地高,MBC 比重变化不大,MOC 和 HFOC 比重比对照耕地低。同时发现,经过土地复垦之后,WDOC、POC、LFOC 和 MBC 这类占比重较小的组分比重增长较快,甚至已经超过对照耕地的比重,而 MOC 和 HFOC 这类占比重较大的组分则恢复较慢,与对照耕地相比仍有较大差距,说明复垦土壤的有机碳含量低于对照耕地主要是由于 MOC 和 HFOC 组分恢复较慢所引起。

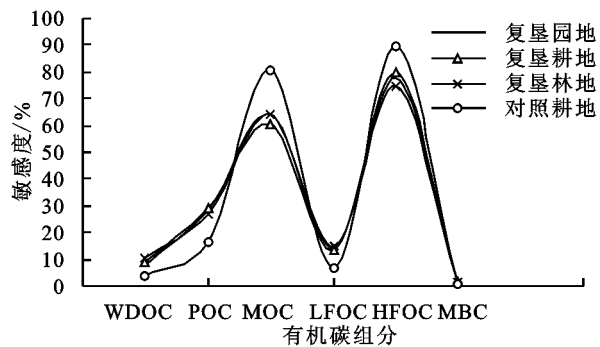


图 3 不同利用方式的土壤有机碳组分占各自 SOC 的比重

2.3.2 土壤有机碳组分丰富度分析 建立基于 LSD 差异的有机碳组分丰富度公式为: $F(X)=\sum_{i=1}^n X_i$ 。式中: X 为地类; n 为有机碳组分的种类数(本文为 6); X_i 为 X 地类中第 i 个组分含量后的字母。对字母 $a\sim z$ 进行自主递减赋值,最后得分越高说明该地类的各组分含量及丰富度好。

结合表 3 数据,采用公式 $F(X)$ 来计算各地类的土壤在不同土层深度的有机碳组分丰富度,通过对 $a=11, b=10, c=8, \dots, k=1$ (两个字母的则取平均数,如 $ab=10.5$) 进行赋值,得到不同利用方式的土壤在不同土层深度的有机碳组分丰富度(表 5)。与其他利用方式及对照相比发现,复垦园地在 0—40 cm 的 F 值及 F 均值较高,有机碳组分丰富度较高。另外,复垦林地在 40—60 cm 的 F 值较高,复垦耕地的各层 F 值均较低。复垦园地的组分在 0—40 cm 恢复较好,复垦林地在 40—60 cm 恢复较好,复垦耕地恢复效果一般。在 0—60 cm 的综合指数(F 均值)上表现为复垦园地>复垦林地>复垦耕地。

表 5 不同土层深度的有机碳组分丰富度

利用方式	土层深度/cm	F 值	F 均值
复垦园地	0—20	60.0	72.00
	20—40	123.0	
	40—60	33.0	
复垦耕地	0—20	45.0	31.67
	20—40	26.0	
	40—60	24.0	
复垦林地	0—20	46.5	44.17
	20—40	38.0	
	40—60	48.0	
对照耕地	0—20	61.0	53.50
	20—40	53.5	
	40—60	46.0	

2.3.3 土壤有机碳组分敏感性分析 在基于前人 SSI 模型^[1]的基础上根据实际情况进行优化,建立了组分敏感指数模型 CSI(component sensitivity index)。CSI(X)=(复垦地 $X_{\text{均值}}$ - 对照地 $X_{\text{均值}}$)/对照地 $X_{\text{均值}} \times 100$ 式中: X 为具体某种组分;CSI(X) 为 X 组分受复垦

工作影响的敏感程度,结果中正数为正敏感,负数为负敏感,正敏感说明复垦工作会导致组分含量增加,反之亦然。绝对值越大敏感越高。

通过对数据运用 CSI 模型,得到土壤有机碳敏感性分析表(表 6)。由表 6 可知,复垦园地的 WDOC、POC、LFOC 和 MBC 呈正敏感,其中 MBC 正敏感最大,达 90.38,MOC 和 HFOC 呈现负敏感,分别达 -54.02 和 -49.41;复垦耕地的各有机碳组分均呈负敏感,其中 MOC 和 HFOC 的负敏感达 -76.29 和 -71.61;复垦林地的 WDOC 和 MBC 呈正敏感,POC、MOC、LFOC、HFOC 呈负敏感,其中 MOC 和 HFOC 的负敏感达 -63.54 和 -61.6。总体上看,复垦土壤的 MOC 和 HFOC 均呈大数值负敏感,复垦园地的有机碳组分恢复状况优于林地和耕地,值得推广。

表 6 复垦土壤有机碳组分敏感性分析

利用方式	WDOC	POC	MOC	LFOC	HFOC	MBC
复垦园地	12.15	0.51	-54.02	16.93	-49.41	90.38
复垦耕地	-28.42	-44.86	-76.29	-40.79	-71.61	-14.12
复垦林地	19.99	-24.89	-63.54	-1.46	-61.60	22.24

3 讨论

早期的复垦工作由于追求土地平整而对土壤进行过多的机械压实,导致土壤结构遭到破坏,造成的结果是复垦土壤的压实度偏高,土壤质地较差,砾石比较大,有机碳占比下降。本研究表明,3 种复垦土壤在 0—60 cm 土层 TC、SOC 和 SOCD 的数值均小于对照耕地,不同利用方式之间 TC、SOC 和 SOCD 的大小关系为复垦园地>复垦林地>复垦耕地。复垦工艺和后期管理的不同是导致不同复垦土壤存在一定差异的主要原因。

在 0—60 cm 土层,复垦园地的有机碳组分恢复情况较好,WDOC、LFOC、MBC 的含量甚至高于对照耕地,复垦林地仅有 WDOC 和 MBC 略高于对照耕地,而复垦耕地的有机碳组分状况较差,其含量均低于对照耕地。在不同土层深度之间,复垦园地表层的有机碳组分很丰富,WDOC、POC、LFOC、MOC 等均大于对照等地,但在 20—60 cm 土层中,除了 MBC 与对照耕地含量相当,其他都小于对照耕地;复垦林地在 20—40 cm 土层之间有机碳组分较差,表层和深层的组分状况较好。复垦耕地除了 MBC,其他组分在各土层之间含量均显著小于对照耕地。这种差异是由于不同利用方式后期管理造成的,园地上植物种类较多,植被覆盖率较好,作物产生的养分及作物死亡后形成腐殖质产生“碳汇”作用,因而在 0—20 cm 土层有机质组分含量较丰富,深层含量不足。由于林

地的根系较深,林地深层的有机质组分状况较好。与其他地区的复垦耕地不同,本文采样点地处矿区,利用方式以园地为主,只有少量耕地,且以大田方式运营,任由作物生长,很少进行后期管理,因而导致产量偏低,有机质含量不佳。

通过从组分比重、组分丰富度和组分敏感性3个角度对有机碳组分进行分析,发现与对照耕地相比,复垦土壤中MOC和HFOC比重下降明显,MOC和HFOC对复垦活动呈现很大的负敏感,同时MOC和HFOC与SOC呈极显著正相关,说明复垦土壤的有机碳含量低于对照耕地,其主要原因是由于MOC和HFOC含量下降引起的。再结合组分的丰富度可知,复垦园地的有机碳组分丰富度最高,且MOC和HFOC比重在3种利用方式中最高,负敏感度也最轻,因而在该地区进行粉煤灰填充复垦后建议作为园地进行农业生产利用。

4 结论

(1)复垦后的土地压实度偏高,3种利用方式的TC、SOC和SOC_D的数值均小于对照耕地,不同利用方式之间TC、SOC和SOC_D均差异显著($P < 0.05$),大小关系表现为复垦园地>复垦林地>复垦耕地。

(2)不同利用方式之间有机碳组分差异明显,SOC与各组分之间均表现为极显著正相关,说明SOC与组分之间关系密切。同时研究发现,比重较小的组分恢复较快,甚至已经超过对照耕地的含量,而MOC和HFOC这类占比重较大的组分则恢复较慢,与对照耕地相比仍有较大差距。这是复垦土壤有机碳含量低于对照耕地的主要原因。

(3)通过从组分比重、组分丰富度和组分敏感性3个角度对有机碳组分进行分析发现,与其他2种利用方式相比,复垦园地更有利于有机碳及组分的恢复,建议在该地区进行推广。

参考文献:

- [1] Bodlák L, Křiváková K, Kobesová M, et al. SOC content: An appropriate tool for evaluating the soil quality in a reclaimed post-mining landscape[J]. Ecological Engineering, 2012, 43(43): 53-59.
- [2] 王金满,郭凌俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013,

29(21): 223-232.

- [3] 陆晓宇,张洪江,程金花,等.地形因子与人工林土壤有机碳密度的关系:以晋西黄土丘陵区为例[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 48-50, 58.
- [4] 马明东,李强,罗承德,等.卧龙亚高山主要森林植被类型土壤碳汇研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 27-131.
- [5] Shrestha R K, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation[J]. Geoderma, 2011, 161(3/4): 168-176.
- [6] 闫锐,李彦霖,邓良基,等.3种有机物料对宅基地复垦土壤易变有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 233-241.
- [7] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. Geoderma, 2014, 232/234(12): 81-87.
- [8] 陈高起,傅瓦利,沈艳,等.岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 123-129.
- [9] 杨长明,欧阳竹,杨林章,等.农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [10] 王胜楠,邹洪涛,张玉龙,等.秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 154-158.
- [11] 余健.高潜水位区采煤塌陷地复垦土壤碳库特征[D]. 江苏 徐州:中国矿业大学, 2014.
- [12] 李新举,胡振琪,李晶.采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280.
- [13] 王攀磊,秦凤琴,蔡培,等.华北半湿润地区土壤酸化和有机碳测定方法的比较[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 863-870.
- [14] 马听听,许明祥,张金,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下深层土壤轻组有机碳剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1366-1375.
- [15] 魏云敏,胡海清,孙家宝,等.不同强度火烧对轻组和重组有机碳的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(18): 5840-5843.
- [16] 陈璐豪,江长胜,吴艳,等.耕作方式对紫色水稻土总有机碳及颗粒态有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 197-201.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.