

不同复垦年限煤矸山重构土壤有机碳及其组分差异^①

张宇婕, 于亚军*

(山西师范大学地理科学学院, 山西临汾 041000)

摘要: 土壤有机碳含量是土壤肥力状况的重要标志之一, 其活性组分对田间管理措施反映敏感。因此, 分析煤矸山复垦重构土壤有机碳含量及其组分差异对于揭示土壤碳库变化、指导复垦地田间管理措施的实施有重要意义。本研究以山西省霍州曹村煤矸山复垦后 5 a(R-5a)、7 a(R-7a)和 9 a(R-9a)的果园为对象, 通过与当地原地貌果园(CK)对比, 分析了 3 种复垦样地土壤总有机碳(TOC)及其组分可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)、轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC)的差异, 以及与土壤环境因子间的关系。结果表明: 随复垦年限的增加, 3 种复垦样地土壤 TOC、LFOC 和 HFOC 含量均呈先增后减趋势, DOC 含量呈增加趋势, MBC 含量呈先减后增趋势; 但与 CK 相比, 3 种复垦样地土壤 TOC、DOC、MBC、LFOC 和 HFOC 含量均明显偏低。 DOC/TOC 和 MBC/TOC 在 R-7a 样地中最低, LFOC/TOC 随复垦年限的增加呈增加趋势, HFOC/TOC 呈减少趋势, 表明土壤中更多的有机碳从稳定态转变为活性态。 土壤全氮、全磷、碱解氮、碳氮比、黏粒含量、pH 和含水量均不同程度影响有机碳含量, 其中全氮、全磷、黏粒含量和土壤 pH 为关键因子。

关键词: 煤矸山; 土壤有机碳; 活性有机碳; 重构土壤

中图分类号: S158 **文献标识码:** A

煤矸山是采煤过程产生的固体废物煤矸石堆积形成的^[1], 其堆存中不仅侵占土地, 而且通过扬尘、自燃、雨水淋溶等方式造成土壤、水体和空气污染^[2], 导致矿区生态环境恶化^[3-4]。因此, 煤矸山治理是改善矿区环境、实施矿区生态重建的迫切任务^[5]。在我国北方地区, 煤矸山治理多采用推平覆土后进行植被绿化的方式, 其作业过程包括灌浆灭火、推平碾压和覆土造地 3 个阶段^[6]。但由于推平覆土时所用土壤基本是没有熟化或熟化程度很低的生土, 加之推平碾压和覆土造地时通过工程措施改变了原有土壤结构和层次特点, 所形成的“重构土壤”存在结构差, 养分、水分极度匮乏等问题, 成为后续植被恢复的主要限制因素; 并且煤矸山复垦地往往优先被利用为农业用途^[7], 因而其土壤养分状况的优劣尤为关键。所以培肥地力, 增加土壤碳、氮等养分是复垦地利用的关键。土壤有机碳含量是土壤肥力高低的重要标志, 其活性组分可溶性有机碳(DOC)、轻组有机碳(LFOC)和微生物生物量碳(MBC)虽占总有机碳(TOC)含量的比例较小, 却是植物养分的直接来源^[8], 也可以灵敏地反映

农田管理措施对土壤肥力的影响^[9]。同时, 查明土壤有机碳库动态变化和固碳能力的影响因素, 实现土壤碳库由“碳源”向“碳汇”转变, 对于维护土壤生态环境, 实现矿区复垦地可持续性利用具有重要意义^[10-11]。

目前, 针对山西省矿区复垦土壤有机碳含量动态变化的研究结论仍存在争议, 如: 王金满等^[12]认为安太堡煤矿排土场复垦后土壤有机碳随复垦时间增加呈先增后减趋势, 但也有研究认为该矿区复垦后土壤有机碳含量呈逐渐增加趋势^[13]。而针对复垦土壤有机碳含量的影响因素^[14]有研究认为, 土壤有机碳与含水量呈正相关, 与容重和 pH 呈负相关^[10]; 也有研究认为与含水量负相关, 与 pH 正相关^[15]; 还有的认为与含水量、容重和 pH 均为负相关^[16], 可见研究结论存在争议, 因此, 该问题仍有待研究。同时, 目前以煤矸山重构土壤为样地进行有机碳动态变化和影响因素方面的研究较少, 由于煤矸山复垦重构土壤可能受到下层低 pH 和高重金属含量矸石的影响, 并且复垦土壤本身水肥匮乏、结构紧实^[17]等也会影响复垦土壤有机碳积累和转化。相较其他类型的复垦

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41301304) 和山西师范大学研究生科技创新项目(01053006)资助。

* 通讯作者(yuyajun0211@126.com)

作者简介: 张宇婕(1994—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态恢复。E-mail: zhangyujie3936@163.com

地,煤矸山重构地中有机碳含量的影响因素更多、也可能更复杂。因此,以此为对象研究有机碳随复垦年限变化动态及影响因素,对于查明重构土壤有机碳库的变化动态、揭示土壤碳累积的主要影响因素、探索煤矸山复垦地合理的田间管理措施、实现复垦地持续利用具有重要意义。

山西省是我国北方地区最早开展矿区生态治理的省份之一。目前,早期形成的煤矸山大都通过推平覆土的方式进行了复垦治理。本文选取山西省霍州市霍煤集团典型复垦煤矸山,以复垦 5、7 和 9 a 的果园为研究对象,分析 3 种复垦年限土壤 TOC 及其组分 DOC、MBC、LFOC 和 HFOC (重组有机碳)含量的差异,揭示影响重构土壤有机碳组分变化的土壤因子,研究结果可为煤矸山复垦地田间管理措施的实施和复垦地的持续利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省霍州市霍煤集团曹村矿区,该矿距霍州市 7 km。该区为温带大陆性季风气候,年均气温 12.2℃,年降水量 353 ~ 688 mm,主要集中在 7、8、9 三个月,年日照时数 2 265 h,土壤类型主要为褐土。研究样地位于该矿南下庄矸石山(36°30'47.9" N, 111°42'11.1" E),海拔为 560 m。煤矸石堆存时形成东、南、西 3 个山头,矸石堆存量约 200 万 t,占地约 1.6 万 m²。于 2008 年、2010 年和 2012 年分别对煤矸山东、南和西 3 个山头采用推平覆土的方式进行了复垦治理(包括灌浆灭火、推平碾压和覆土造地 3 个技术环节),覆土厚度约为 100 cm,覆土土壤均取自煤矸山附近。覆土之后进行了植被绿化,先后分别种植桃树(*Prunus persica* L.)、石榴树(*Punica granatum* Linn.)和山楂树(*Crataegus pinnatifida*)。由此,形成 3 种复垦年限的果园(面积分别约为 700、650 和 500 m²)。3 种复垦果园水肥管理措施与当地原地貌果园一致,每年 3 月中旬施农家肥一次(施肥量约为 N 100 kg/hm², P₂O₅ 200 kg/hm²),每年初春和入冬时各浇水 1 次。

1.2 样品采集

土样采集时间为 2017 年 10 月,样地为复垦 5、7 和 9 a 果园(分别记作 R-5a、R-7a 和 R-9a),并选择煤矸山附近原地貌果园(种植桃树, *Prunus persica* L.)为对照(CK)。采样时各样地随机用 S 型选取 5 个样点,每样点 3 次重复,采样深度为 0 ~ 20、20 ~ 40 cm,采样工具为土钻(直径 3 cm)。将各样点土样分层混

合,去除矸石、植物残体等杂质后装袋。土样运回实验室后按四分法分为两部分,过孔径 10 目土壤筛(2 mm),一部分置于 4℃ 冰箱中保存用于测定 DOC 和 MBC,另一部分置于室内自然风干,用于测定 TOC、LFOC、HFOC 和土壤理化性质。

1.3 测定方法与数据分析

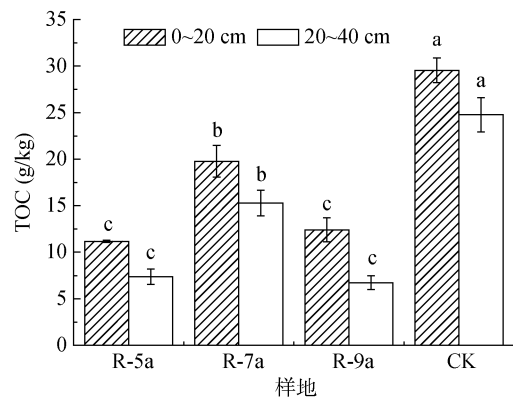
土壤 TOC 测定采用重铬酸钾外加热法;DOC 测定采用去离子水浸提,TOC-VCSH 分析仪(日本岛津公司)测定;LFOC 和 HFOC 测定采用有机碳密度分组法;MBC 测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提,TOC-VCSH 分析仪测定^[18]。土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、黏粒含量、pH 和含水量(SWC)等理化性质测定均采用国标方法进行^[19]。

本研究数据采用 Excel 和 SPSS 软件处理、计算及分析。采用 SPSS 21.0 统计分析软件进行单因素方差分析(Tukey 法)、主成分分析和 Pearson 相关分析,制图采用 Origin 8.6 软件。

2 结果与分析

2.1 3 种复垦年限样地土壤总有机碳含量的差异

图 1 是 3 种复垦年限样地和 CK 样地土壤 TOC 含量的对比情况。首先,从 3 种复垦样地间的差异来看,在 0 ~ 20 cm 土层,相比 R-5a 样地,R-7a 和 R-9a 样地土壤 TOC 含量分别增加了 71.1% 和 11.2%;而在 20 ~ 40 cm 土层,相比 R-5a 样地,R-7a 样地 TOC 含量增加了 107%,但 R-9a 样地 TOC 含量下降了 4.5%。可见,与 R-5a 样地相比,R-7a 样地土壤 TOC 含量明显增加,但 R-9a 样地增幅减小甚至出现下降趋势。其次,从复垦样地与 CK 样地的差异看,3 种



(图中不同小写字母表示同一土层不同样地间差异显著($P < 0.05$),下同)

图 1 各样地土壤 TOC 含量的差异
Fig.1 Soil TOC contents in different sample plots

复垦样地土壤 TOC 含量在 2 个土层中均明显低于 CK 样地。

2.2 3 种复垦年限样地土壤有机碳各组分含量的差异

图 2 是 3 种复垦样地和 CK 样地有机碳组分 DOC、LFOC、HFOC 和 MBC 含量差异情况。从 DOC 含量来看(图 2A), 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 R-5a 和 R-7a 样地无差异, 但 R-9a 样地明显偏高; 从 MBC 含量来看(图 2B), 0~20 cm 土层 R-7a 样地低于 R-5a 和 R-9a 样地, 而 20~40 cm 土层则表现为 R-5a 高于 R-7a 和 R-9a 样地; 再从 3 种样地 LFOC 和 HFOC 含量的差异看(图 2C、D), 0~20 cm 土层两者变化一致, 均表现为随复垦年限增加先增后减的趋势, 但 20~40 cm 土层 LFOC 无差异, HFOC 则呈现为 R-7a 样地高于 R-5a 和 R-9a 样地。同时, 与 CK 样地相比, 3 种复垦样地 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 DOC、LFOC、HFOC 和 MBC 含量均明显偏低或与之相当。

此外, 从 3 种复垦样地土壤有机碳各组分占 TOC 比例的差异来看(表 1), 3 种复垦样地 DOC/TOC 和 MBC/TOC 分别在 0~20 cm 和 20~40 cm 两个土层

变化趋势一致, 均为 R-7a 样地低于 R-5a 和 R-9a 样地, 且 R-5a 与 R-9a 相当。但 LFOC/TOC 和 HFOC/TOC 在两土层趋势不同, 随复垦年限增加在 0~20 cm 土层 LFOC/TOC 呈递增趋势, HFOC/TOC 则呈递减趋势; 在 20~40 cm 土层 LFOC/TOC 为先降后增, 而 HFOC/TOC 为先增后降。但从 LFOC/TOC 和 HFOC/TOC 在两土层中平均值的变化趋势看, 随复垦年限增加前者表现为先减后增, 后者表现为先增后减, 但 R-5a 和 R-7a 差异不显著。表明, 随复垦年限的增加, 土壤中更多的有机碳从稳定态转化为活性态。

2.3 3 种复垦年限样地土壤有机碳变化的影响因子

2.3.1 土壤有机碳组分与土壤理化性质的相关性

选取土壤 TN、TP、TK、AN、AP、AK、SWC、黏粒含量、pH 和 C/N 等因子与土壤有机碳各组分含量进行相关分析。从表 2 中可见, TN、TP、AN、C/N、pH、黏粒含量和 SWC 均是 TOC 含量的主要影响因子, TN、TP、AN 和黏粒含量是 DOC 的主要影响因子, TP 和 C/N 是 MBC 的主要影响因子, TN、TP、AN、C/N、黏粒含量和 SWC 是 LFOC 的主要影响因子, TN、TP、AN、pH 和 SWC 是 HFOC 的主要影响因子。

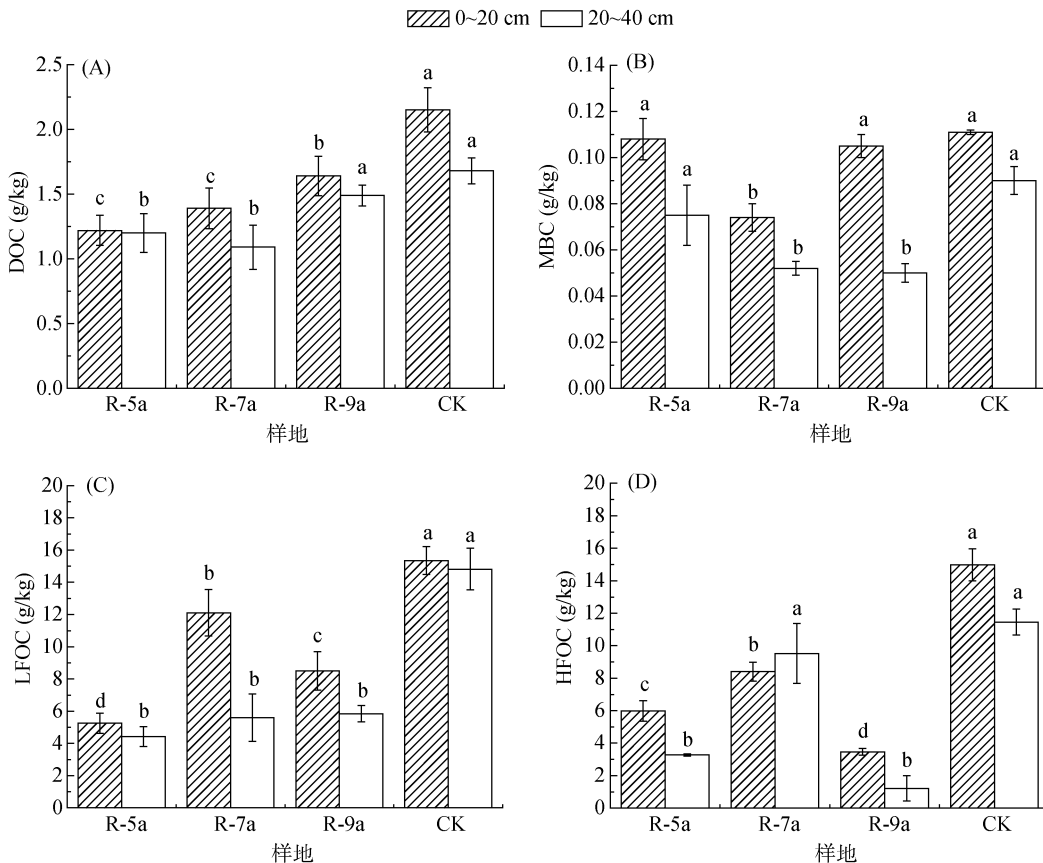


图 2 各样地土壤 DOC、MBC、LFOC 和 HFOC 含量的差异

Fig. 2 Contents of SOC components in different sample plots

表 1 各样地土壤有机碳各组分占总有机碳的比例(%)
Table 1 Proportions of soil organic carbon components in TOC in different sample plots

土层(cm)	样地	DOC/TOC	MBC/TOC	LFOC/TOC	HFOC/TOC
0 ~ 20	R-5a	11.0 a	1.0 a	47.0 c	53.0 a
	R-7a	6.1 b	0.4 b	61.2 b	38.8 b
	R-9a	13.3 a	0.9 a	68.4 a	31.6 c
	CK	7.3 b	0.4 b	52.0 c	48.0 a
20 ~ 40	R-5a	16.5b	1.0 a	59.9 b	40.1 b
	R-7a	5.7 c	0.3 c	38.1 c	61.9 a
	R-9a	22.2 a	0.8 b	82.6 a	17.4 c
	CK	6.8 c	0.4 c	59.8 b	40.2 b
平均	R-5a	13.8 a	1.0 a	53.5 b	46.6 a
	R-7a	5.9 b	0.4 b	49.7 b	50.4 a
	R-9a	17.8 a	0.9 a	75.5 a	24.5 b
	CK	7.1 b	0.4 b	55.9 b	44.1 a

注：同列不同小写字母表示同一土层不同样地间差异显著($P < 0.05$)。

表 2 总有机碳及其各组分含量与土壤性质的 Pearson 相关系数
Table 2 Correlation coefficients between soil physicochemical properties and soil organic carbon and its components

	TN	TP	TK	AN	AP	AK	C/N	pH	黏粒	SWC
TOC	0.939**	0.783*	-0.222	0.819*	0.282	0.417	0.712*	-0.660*	0.730*	-0.722*
DOC	0.689*	0.735*	0.149	0.647*	-0.164	0.327	0.351	-0.369	0.866**	-0.402
MBC	0.601	0.717*	0.285	0.298	-0.375	0.555	-0.670*	-0.453	0.355	-0.529
LFOC	0.831*	0.671*	-0.143	0.743*	0.251	0.297	0.721*	-0.520	0.822*	-0.698*
HFOC	0.922**	0.766*	-0.344	0.754*	0.254	0.439	0.632	-0.745*	0.550	-0.701*

注：n=45，* 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关，** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

2.3.2 土壤有机碳影响因子的主成分分析 将相关分析结果中与土壤有机碳含量显著相关的指标 TN、TP、AN、C/N、黏粒含量、pH 和 SWC 进行主成分分析。结果表明(图 3)，前两个成分方差贡献率分别为 58.49%、24.71%，累积贡献率达 83.20%，涵盖了原始数据的大部分信息。从成分图来看，对第一主成分起主要贡献的指标为 TN 和 TP；对第二主成分起主要贡献的指标为黏粒含量、pH、C/N、SWC 和 AN。说明对 3 种复垦年限样地有机碳影响最大的是 TN 和

TP，且 TN 是影响第一主成分的主要因子，黏粒含量是影响第二主成分的主要因子，其次是 pH。其余指标的贡献较小。

3 讨论

3.1 煤矸山不同复垦年限果园土壤有机碳库的变化特征

土壤有机碳是植物养分的重要来源，也是土壤质量的核心^[20]。本研究发现，3 种复垦年限样地 R-5a、R-7a 和 R-9a 土壤 TOC 含量呈先增后减的趋势，这与王金满等^[12]在朔州安太堡矿区复垦土壤中的研究结果一致。土壤有机碳累积量是增加和损失之间的净平衡决定的^[21-22]。对本研究样地，土壤有机碳的增加主要为有机肥施用和凋落物归还，而有机碳的损失主要为植物吸收和土壤动物、微生物分解消耗。造成 3 种样地 TOC 含量如此变化的原因可能在于，由于本样地为逐年施肥，因而 R-5a 样地相比 R-7a 样地有机肥施入总量偏低，加之果树植株小，凋落物归还量少，因而养分输入小于输出，土壤 TOC 为净损失；而 R-9a 样地由于果树生长旺盛，对养分的消耗大于

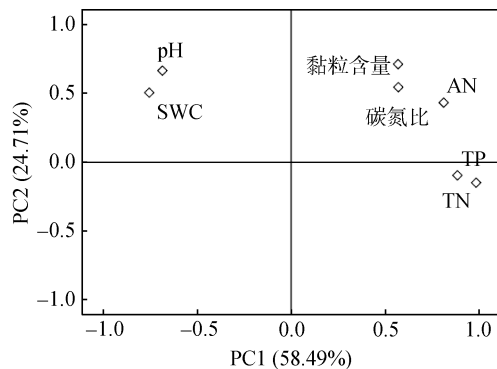


图 3 土壤指标主成分分析
Fig.3 PCA analysis for soil indexes

输入,加之土壤动物和微生物快速分解,从而造成土壤 TOC 含量较 R-7a 样地相对减少。因此,随着复垦年限的增加,在植物生长茂盛期,加大施肥力度是缓解煤矸山重构土壤有机碳损失、保证有机碳库稳定的关键。

此外,3 种复垦样地 DOC 含量总体呈随复垦年限增加而增加的趋势,结合 3 种样地 TOC 呈先升后降的情形,说明相比 R-5a 和 R-7a 样地,R-9a 样地中有更多 TOC 转化为 DOC,这可能由于随复垦年限增加,植物根系和微生物作用增强使复垦时被压实的土壤结构改善(R-7a 和 R-9a 样地黏粒含量较 R-5a 样地分别增加 36.3% 和 60.0%),土壤贮水能力相应提高,有利于土壤中 TOC 向 DOC 的转化^[23]。此外,本研究发现,土壤 MBC 含量在 R-7a 样地明显低于 R-5a 和 R-9a 样地,这可能是由于 R-7a 样地中较高的 C/N(R-7a 样地 C/N 为 29.8%,较 R-5a 和 R-9a 分别高 57.1% 和 27.2%)会对土壤微生物代谢活动产生抑制^[24],造成 MBC 含量下降,也导致 MBC/TOC(微生物熵)相应下降,即土壤有机碳周转速率减慢^[25]。研究认为,土壤 C/N 比过高(>25%)会因氮元素缺乏造成土壤微生物活性减弱^[26],导致有机碳矿化量减少。复垦地单施有机肥可能会因氮素供应不足而难以保持合理的 C/N 比,使有机碳周转速率减慢,因此,有机肥和无机肥配施至关重要。

本研究还发现,3 种样地土壤 TOC、DOC、MBC、LFOC 和 HFOC 含量均低于当地原地貌果园(CK)。当然,由于本研究样地复垦年限相对较短,是否存在较长复垦年限后土壤有机碳及其组分含量达到与原地貌果园相当水平的状况仍有待研究。但就现有结论看,复垦年限较短的果园(<9 a)土壤有机碳及其组分含量明显低下,而造成该现象的主要原因可能是煤矸山复垦土壤本身碳元素缺乏。因此,在原地貌果园施肥量(N 100kg/hm², P₂O₅ 200 kg/hm²)的基础上适当加大施肥量对快速增加煤矸山复垦地土壤碳量十分必要。

3.2 煤矸山不同复垦年限果园土壤有机碳变化的影响因子

本研究分析表明,土壤 TN、TP、AN、C/N、黏粒含量、pH 和 SWC 均不同程度地影响有机碳及各组分含量,其中 TN 和 TP 为主要因子,其次为黏粒含量和 pH,并且 TN、TP、黏粒含量与有机碳含量呈正相关,而 pH 与有机碳含量呈负相关,这与其他研究结论一致^[25,27]。氮、磷通过增加土壤营养元素的循环,促进植物地上部及根系的生长^[28-29],在增加土壤有机碳含量的同时增加进入土壤的根系分泌物,使土壤

活性有机碳含量增加^[30]。研究认为,土壤黏粒拥有大的比表面积对有机碳的吸附效应增强,土壤中黏粒含量升高,土壤孔隙变少,透气性变弱,会抑制好氧微生物的活性,从而降低土壤有机碳的分解速率^[31],减少有机碳的输出^[32],提高有机碳储量。而土壤 pH 与有机碳含量呈负相关的原因可能在于,pH 增高会造成溶解性酚类浓度升高^[33],降低水解酶活性,影响微生物数量和种类,并且也会抑制有机碳的溶解,从而减少土壤有机碳及组分含量。

但值得注意的是,已有原地貌样地中研究表明,在旱地土壤上,当土壤水分含量低于田间持水量时,土壤水分与有机碳含量呈正相关,但本样地中土壤含水量与有机碳含量呈负相关。出现此现象的原因可能在于,本研究中 3 种样地土壤容重明显偏高(3 种样地土壤容重平均值为 1.59 g/cm³,较原地貌样地偏高 16.9%),使土壤孔隙状况较差,造成土壤通气性能较差,而土壤水分主要通过调节通气性能对有机碳的转化产生影响^[34]。此结果可能是由于复垦样地土壤结构不良导致通气不佳造成的。综上表明,土壤性质不佳是限制复垦地土壤有机碳分解和转化的另一原因。因此,采取合理的田间管理措施,如有机肥和无机肥配施以维持合理的土壤 C/N 比,果园深松以改善土壤结构,提高土壤通气性能,必要时可通过使用土壤改良剂,改变土壤孔隙度、pH 等可能会促进有机碳的积累。

4 结论

1)随复垦年限的增加,3 种复垦样地土壤 TOC、LFOC 和 HFOC 含量均呈先增后减趋势,但 DOC 含量呈增加趋势,MBC 含量则呈先减后增趋势。同时,与当地原地貌果园(CK)相比,3 种复垦样地土壤 TOC、DOC、MBC、LFOC 和 HFOC 含量均明显偏低,说明加大有机肥施用并采取合理的田间管理措施改善土壤性质,是增加煤矸山复垦地土壤碳库的必要措施。

2)3 种样地中,DOC/TOC、MBC/TOC 在 R-7a 样地中最低,但是,随复垦年限的增加,LFOC/TOC 呈增加趋势,HFOC/TOC 呈递减趋势,表明土壤中更多的有机碳从稳定态转变为活性态。

3)土壤 TN、TP、AN、黏粒含量、pH 和 SWC 与有机碳及其组分含量均存在一定程度的相关性,其中 TN、TP、黏粒含量和 pH 为关键因子,并且有机碳含量与 TN、TP 和黏粒含量呈正相关,而与 pH 呈负相关。

参考文献：

- [1] 钱奎梅, 丽萍, 李江. 矿区复垦土壤的微生物活性变化[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 27(6): 59-63
- [2] 彭少麟. 恢复生态学及植被重建[J]. 生态科学, 1996, 15(2): 26-31
- [3] 李晋川, 王翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 66-71, 79
- [4] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875
- [5] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学, 2000, 14(1): 6-11
- [6] 王煜琴, 李新举, 胡振琪, 等. 煤矿区复垦土壤压实时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 223-227
- [7] 于亚军, 任珊珊, 郭李凯, 等. 两种利用类型煤矸山复垦重构土壤贮水特性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 44-48
- [8] 邬建红, 潘建军, 葛序娟, 等. 不同农业利用方式土壤有机碳矿化及其与有机碳组分的关系[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 178-182
- [9] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on the degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 393-406
- [10] 王同智, 薛焱, 包玉英, 等. 不同复垦方式对黑岱沟露天矿排土场土壤有机碳的影响. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 174-178
- [11] 李君剑, 严俊霞, 李洪建. 矿区不同复垦措施对土壤碳矿化和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4178-4185
- [12] 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
- [13] 辛芝红, 李君剑, 赵小娜, 等. 煤矿区不同复垦年限的土壤有机碳矿化和酶活性特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(10): 1580-1586
- [14] 陈小红, 段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 765-772
- [15] 陈孝杨, 周育智, 严家平, 等. 覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1236-1243
- [16] 周育智, 陈孝杨, 王芳, 等. 安徽省淮南市采煤沉陷生态修复区表层土壤有机碳分布[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 439-442
- [17] Vinduškova O, Frouz J. Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: A quantitative review[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(5): 1685-1698
- [18] Ren T Z, Grego S. Soil bioindicators in sustainable agriculture[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2000, 33(1): 68-75
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- [20] 丁青坡, 王秋兵, 魏忠义, 等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 262-267
- [21] O'Rourke S M, Angers D A, Holden N M, et al. Soil organic carbon across scales[J]. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3561-3574
- [22] 原苓, 孙崇凤, 李华, 等. 微生物肥料对铝矿废弃地复垦区土壤有机碳的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 419-425
- [23] Yang X, Meng J, Lan Y, et al. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 240: 24-31
- [24] 芦思佳, 韩晓增. 长期施肥对微生物量碳的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1355-1358
- [25] Tarafdar J C, Meena S C, Kathju S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposing[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(3): 157-160
- [26] 付传城, 章海波, 涂晨, 等. 滨海苹果园土壤碳氮空间分布及动态变化研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 857-867
- [27] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860
- [28] 汤松波, 刁丹, 任文丹, 等. 鹤山不同植被土壤有机碳分布特征[J]. 土壤, 2018, 50(1): 122-130
- [29] Norby R J, Warren J M, Iversen C M, et al. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America, 2010, 107(45): 19368-19373
- [30] Mendham D S, Sankaran K V, O'Connell A M, et al. Eucalyptus globulus harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(12): 1903-1912
- [31] 潘丽冰, 徐凡珍, 沙丽清. 生物炭对土壤理化性质及橡胶幼苗生物量的影响[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 449-456
- [32] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20: 1-12
- [33] 廖丹, 于东升, 赵永存, 等. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 517-527
- [34] 魏小波, 何文清, 黎晓峰, 等. 农田土壤有机碳固定机制及其影响因子研究进展[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 487-494

Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Components in Coal Waste Piles Reclaimed with Different Years

ZHANG Yujie, YU Yajun *

(College of Geography, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) content is one of important indicators of soil fertility, and its active components are sensitive to field management measures. Therefore, it is of great significance to analyze the characteristics of SOC and its components in the reclaimed coal waste piles to reveal the changes of soil carbon pool and guide the implementation of field management measures in the reclamation area. With the reclaimed piles of 5a (R-5a), 7a (R-7a) and 9a (R-9a) in Caocun village in Huozhou City of Shanxi Province as the study objects and the local original orchard as CK, the paper analyzed the differences in soil total organic carbon (TOC) and its components of dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), light carbon organic (LFOC) and heavy organic carbon (HFOC) in three kinds of reclaimed plots, and their relationships with other soil properties were also explored. The results showed that: 1) with the increase of reclamation year, TOC, LFOC and HFOC increased initially and then decreased in the three reclamation plots, DOC increased, and MBC decreased initially and then increased. However, the contents of TOC, DOC, MBC, LFOC and HFOC in the three reclaimed plots were significantly lower than those of CK. 2) DOC/TOC and MBC/TOC were the lowest in the R-7a plot. LFOC/TOC increased with the increase of reclamation year, while HFOC/TOC decreased, indicating that more organic carbon in soil changed from stable state to active state. 3) TN, TP, AN, C/N, clay content, pH value and SWC were all correlated with organic carbon content, among which TN, TP, clay content and pH value were the key factors.

Key words: Coal waste pile; Soil organic carbon; Active organic carbon; Reclamation soil