

高潜水位煤矿区完整复垦周期的土壤碳演变特征

李奇超, 李新举, 闵祥宇

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 在济宁高潜水位矿区的充填复垦区内, 分析完整复垦周期的土壤碳演变特征。通过从塌陷地(M1)、复垦年限为0, 3年的复垦耕地(M2、M3)以及正常耕地(M4)采集土样并检测土壤全碳(TC)、有机碳(SOC)、有机碳密度(SOCD)、有机碳组分(WDOC、POC、MOC、LFOC、HFOC、MBC)及稳定性同位素($\delta^{13}\text{C}$), 研究不同复垦周期阶段下土壤碳空间特征的变化情况。研究表明:(1)塌陷地的TC、SOC、SOCD和各有机碳组分含量较低。经过复垦措施期后, SOCD在复垦当年就恢复到正常耕地的水平, TC和SOC含量随着复垦年限不断增加。WDOC、POC、LFOC、MBC等组分恢复速率较快, MOC和HFOC恢复周期较长。(2)TC、SOC、SOCD和各有机碳组分的恢复速率随着土层深度的增加逐渐减缓。(3)复垦土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值在不同深度间的差异较小, 而标准差和变异系数偏大, 说明复垦土壤层次不明显且同一层次间土壤来源混乱。从整个复垦周期来看, 复垦工作虽具有“碳汇”作用, 但会对土壤层次造成破坏。建议进行塌陷地治理时, 尽量采用对土层扰动较小的复垦方式, 对表土剥离和回填工序进行优化和监督, 从而达到更好的恢复效果。

关键词: 高潜水位; 充填复垦; 复垦周期; 土壤碳演变

中图分类号: S153.6; TD88

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0204-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.032

Soil Carbon Evolution Under a Complete Reclamation Cycle in a Coal Mine Area with the High Groundwater Level

LI Qichao, LI Xinju, MIN Xiangyu

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

Abstract: The soil carbon evolution was studied under a complete reclamation cycle in the Ji'ning coal mine area with the high groundwater level. The stratified sampling and laboratory analysis of the soil were carried out under the different reclamation cycles, including Land subsidence (M1), reclaimed land for 0 and 3 years (M2, M3) and normal cultivated land (M4), to study the total carbon (TC), soil organic carbon (SOC), soil organic carbon density (SOCD), organic carbon components (WDOC, POC, MOC, LFOC, HFOC and MBC) and stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$). The results showed: (1) The contents of TC, SOC, SOCD and organic carbon components in the subsided area were lower. After the reclamation, the SOCD returned to the level of normal cultivated land in the first year, and the TC and SOC contents were increased with the reclamation period. The recovery rates of components such as WDOC, POC, LFOC and MBC were faster, but the MOC and HFOC recovery periods were longer. (2) The recovery rates of TC, SOC, SOCD and organic carbon components gradually decreased with the increase of soil depth. (3) After reclamation, the $\delta^{13}\text{C}$ mean difference was small at different soil depths, and the standard deviation and coefficient of variation were larger, indicating that the layers were not obvious in the reclaimed soil and the soil sources might be confused in the same layer. In conclusion, the reclamation work could promote the role of "carbon sinks", but it could cause damage to soil layer. It was suggested that the reclamation method that disturb the soil layer as little as possible should be adopted, and the topsoil stripping and backfilling process should be optimized so as to achieve better recovery effect.

Keywords: high groundwater level; filling reclamation; reclamation cycle; soil carbon evolution

收稿日期: 2018-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771324); 采煤沉陷地绿色综合治理与生态修复关键技术项目(2016ZDJS11A02)

第一作者: 李奇超(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事土地复垦研究。E-mail: lqc4748@sina.com

通信作者: 李新举(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土地整理和土地复垦研究。E-mail: xinju@sdau.edu.cn

高潜水位矿区^[1]是我国重要的采煤矿区之一,该地区地表潜水位高^[2]、煤粮复合度高^[3],因而煤矿开采易造成大量耕地沉陷,且容易积水^[4-5],致使作物减产甚至绝产,塌陷地治理工作迫在眉睫。自上世纪80年代以来,相关部门一直在探索和发展土地复垦工作^[6]。因此对该地区土地复垦效果的监测,成为当前学术研究的热点问题。有研究^[7-8]证明,土壤中碳的变化能够明显反映土壤的质量状况:以TC、SOC和SOC_D为代表的土壤碳总量指标能够宏观反映土壤理化性质和肥力状况^[9-10];有机碳组分能够从微观的角度敏感地反映土壤质量变化^[11];δ¹³C指标可以用来对土壤层次变化进行跟踪^[12]。近些年来,很多学者在土壤碳的研究方面取得了丰硕成果,如徐占军等^[13]发现煤炭开采对农田土壤碳储量影响为失碳(碳源)效应,各沉陷坡面区土壤有机碳密度随沉陷深度呈现先减小后增大的趋势;渠俊峰等^[14]发现由采煤沉陷造成的斜坡会导致有机碳流失,有机碳碳库出现明显损失;余健^[15]在研究高潜水位区复垦土壤碳库特征时发现,复垦土壤中的全碳和有机碳含量均小于正常耕地;Baumgartl等^[9]发现,随着复垦年限的增加,有机碳的含量随着时间不断增加;Sharma等^[16]发现与土壤固有性质相比,土地后期利用和管理方式更影响土壤有机碳和组分的含量;田丽艳等^[12]发现可以用土壤中的δ¹³C来衡量土壤的新旧程度,不同深度土层在成土时间、有机质积累等方面存在差异,导致δ¹³C值具有一定的差异。目前研究主要存在复垦周期不全或者研究指标单一的问题,尤其当前对高潜水位矿区完整复垦周期下的土壤碳演变特征的研究较少。理论上,一个土地的复垦周期应包括塌陷地(复垦起点)、不同复垦年限的复垦地(措施期和恢复期)和正常耕地(复垦终点)。本文在总结前人研究的基础上,从一个完整复垦周期的角度入手研究一系列碳指标的演变特征,为济宁地区塌陷地治理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

济宁市位于山东省南部,是山东省乃至华北地区重要的煤炭开采区。由于该区域煤粮复合度较高,因而土地塌陷往往会造成农田甚至基本农田的损毁。济宁市通过几十年对塌陷地的治理,总结出一套完整的土地复垦措施。研究区位于太白湖新区南阳湖农场的塌陷地治理区,是济宁市近几年来所实施的重点项目,于2015年对已稳沉的塌陷地采用客土充填复垦方式进行修复。客土充填是指划定取土区,为采煤塌陷地复垦的客土来源,挖掘机挖出深层土壤后,通过运输机械运输至填充区,填充完成后,再进行表土

的覆盖。本试验中的客土来源于南阳湖农场的特定取土区(非塌陷区),其土壤类型为潮土。复垦后土地主要从事农业耕地使用,种植小麦等C3作物。

1.2 土样采集与处理

土样采集:2014年8月至2017年10月间,在济宁市太白湖新区(35°18'N,116°37'E)南阳湖农场布设1个100 m×100 m的典型样区(图1),在该样区处于3种不同复垦状态(M1:塌陷地;M2:新复垦地;M3:已复垦地,复垦3年)时,依次按对角线对称布点(图1)并分3层(图2和图3)采集耕作层土样。同时在样区周边的正常耕地(M4)内用相同的方法布点采样。土样去除枯枝败叶后,经过自然风干、过筛,四分法划样后进行土壤理化性质的测定。

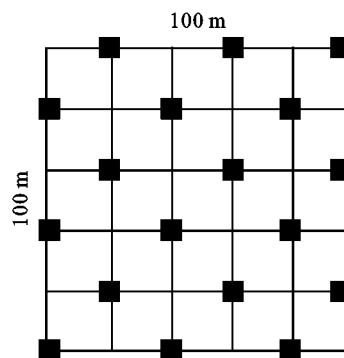


图1 采样点分布示意

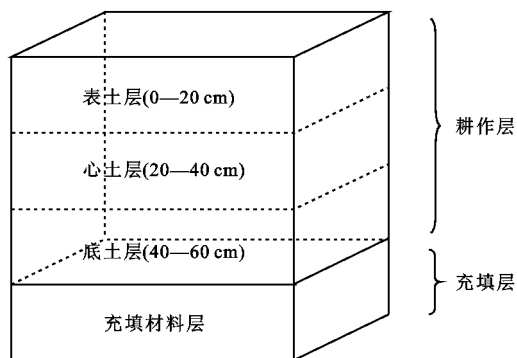
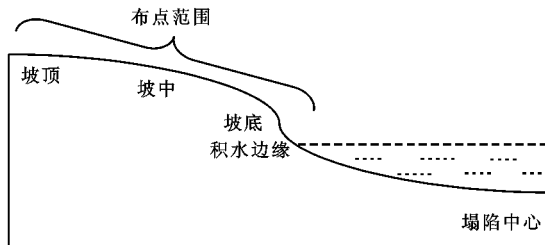


图2 复垦土层结构示意



注:塌陷地(M1)是在坡顶、坡中、坡底和积水边缘的部分布点,未涉及塌陷中心。

图3 典型塌陷地剖面示意

土样处理:土壤容重采用环刀法测定;砾石比采用过筛法测定;土壤全碳(TC)、土壤有机碳(SOC)、轻组有机碳(LFOC)、重组有机碳(HFOC)、颗粒态有机碳(POC)经过不同预处理^[17-20]后采用CNHS元素分析仪测定;土壤微生物碳(MBC)经过预处理^[15]后

采用重铬酸钾氧化法测定;溶解性有机碳(WDOC)经过预处理^[21]后采用 TOC 仪检测测定;矿物结合态有机碳(MOC)采用烘干法^[14]测定;稳定性同位素($\delta^{13}\text{C}$)采用同位素质谱仪检测。土壤有机碳密度(SOCD)计算公式为:

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

式中:SOCD 为土壤有机碳密度(kg/m^2); T_i 为 i 层土壤的厚度(cm); D_i 为 i 层的土壤容重(g/cm^3); SOC_i 为 i 层土壤的有机碳含量(g/kg); C_i 为 i 层土壤 $>2\text{ mm}$ 的砾石所占的体积百分比(%)。

1.3 研究方法

一个完整的复垦周期是从塌陷地开始,经过复垦措施期和复垦恢复期后,其土壤质量恢复到周边正常耕地为止(图 4)。在这个周期中共有 3 个关键点:关键点 1 是塌陷地刚转化成复垦地时土壤碳的演变特征;关键点 2 是复垦地随着时间的推进中(本文为 3 年)土壤碳的演变特征;关键点 3 是当复垦地达到理想土地状态时,预测土壤碳的演变特征。

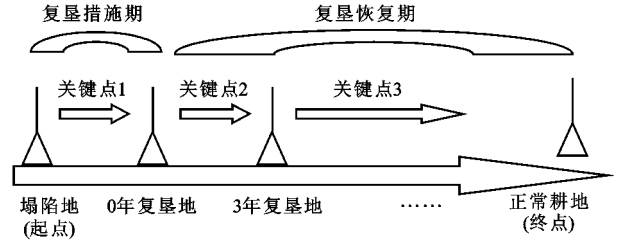
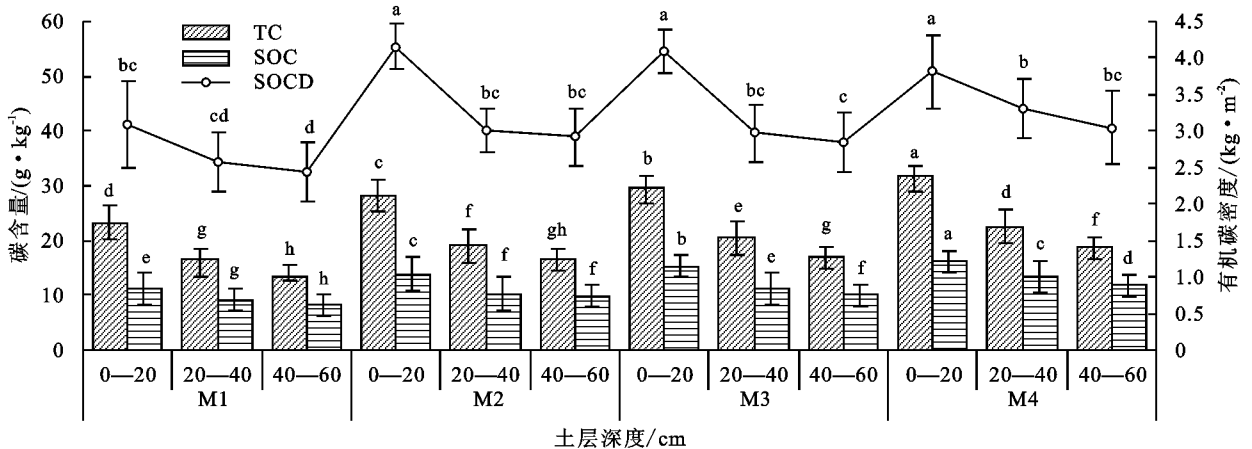


图 4 完整的复垦周期示意

2 结果与分析

2.1 土壤碳总量的演变特征

2.1.1 土壤碳总量的空间特征 从图 5 可以看出,在关键点 1,TC 含量在 0—40 cm 土层间显著增大($P < 0.05$),在 40—60 cm 土层间含量变化不显著;SOC 含量在 0—60 cm 土层间显著增大;SOCD 在 0—20, 40—60 cm 土层间显著增大,在 20—40 cm 土层间差异不大。在关键点 2,TC、SOC 含量在 0—40 cm 土层间均显著增大,在 40—60 cm 土层间含量变化不显著;SOCD 在 0—60 cm 土层间均保持稳定。在关键点 3,TC、SOC 含量在 0—60 cm 土层间均显著增大。



注:采用 LSD 检验,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 5 完整复垦周期内碳总量的空间特征

2.1.2 土壤碳总量的恢复速率 增长率(%)是指某关键点的后指标比前指标提高的百分比;差距比(%)是指某关键点的后指标与正常耕地的差距百分比;年均恢复速率(%)是指根据不同复垦年限的指标推测复垦恢复期内每年能够恢复的增量占正常耕地的百分比。从表 1 可以看出,在关键点 1,复垦工作完成后即可大幅度提高塌陷地中 TC、SOC 和 SOCD 的数值,其中 SOCD 的数值已经恢复到正常耕地水平,TC 和 SOC 的含量与正常耕地相比还有一定的差距。在不同深度的土层间,TC 和 SOC 均在 0—20, 40—60 cm 土层间恢复效果较好,差距比较小,在 20—40 cm 土层间增长率一般,差距比较大;在关键点 2,复垦恢复期中 TC 和 SOC 均在 0—40 cm 土层间恢复率较快,在 40—60 cm 土层间恢复缓慢。从差距比可以看出,TC 和 SOC 均在 0—20 cm 土层间的差距比最小,

20—40, 40—60 cm 土层间的差距比几乎相同。在关键点 3,复垦恢复期中 TC 在 20—40 cm 土层间恢复速率最快,0—20 cm 其次,40—60 cm 土层间恢复速率最慢;SOC 的恢复速率随着土层深度的增加逐渐降低。可以推算出 TC 在 0—40 cm 土层间的复垦周期为 7~8 年,SOC 在 0—40 cm 土层间的复垦周期为 5~10 年,而 TC 和 SOC 在 40—60 cm 土层间恢复周期要超过 10 年。

2.2 土壤碳组分的演变特征

2.2.1 土壤碳组分的空间特征 由前人研究^[22]可知,土壤有机碳组分对自然和人为活动都很敏感,因而可从有机碳组分的角度去分析完整复垦周期中的碳演变特征。由图 6 可知,WDOC 在经过复垦措施期后,其含量得到显著提升,并在经过 3 年的复垦恢复期后,其含量与正常耕地相比已无明显差异;POC、LFOC 和

MBC 经过复垦措施期后,即可恢复到正常耕地的水平;MOC 和 HFOC 在经过复垦措施期后,其含量得

到显著提升,并在经过 3 年的复垦恢复期后,其含量有显著提升,但与正常耕地相比仍有显著的差异。

表 1 完整复垦周期内土壤碳总量恢复速率

土壤碳指标	土层深度/cm	关键点 1		关键点 2		关键点 3	
		增长率/%	差距比/%	增长率/%	差距比/%	年均恢复速率/%	完全恢复年限/a
TC	0—20	21.46	11.17	5.28	6.48	1.56	7.15
	20—40	15.73	15.51	7.40	9.26	2.08	7.45
	40—60	22.47	11.58	1.81	9.98	0.53	>10.00
SOC	0—20	23.73	14.49	8.93	6.10	2.79	5.18
	20—40	12.58	23.99	8.68	16.77	2.41	9.96
	40—60	19.20	17.63	2.49	15.53	0.70	>10.00
SOCD	0—20	25.53	—	—	—	—	复垦当年
	20—40	14.47	—	—	—	—	复垦当年
	40—60	16.46	—	—	—	—	复垦当年

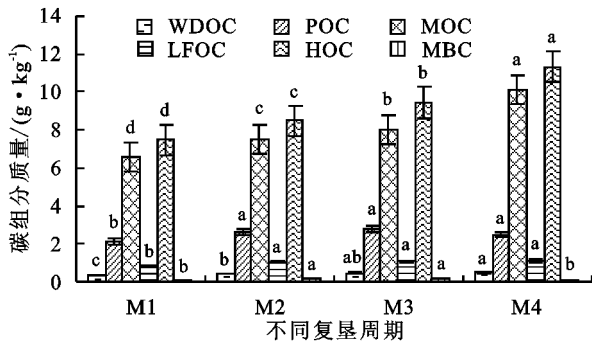


图 6 完整复垦周期内碳组分在 0—60 cm 土层的空间特征

从表 2 可以看出,在经过复垦措施期后,WDOC、MOC、HFOC 和 MBC 在 0—60 cm 土层间均有显著提升,POC 在 0—40 cm 土层间显著提升,在 40—60 cm 土层间变化不显著;LFOC 在 0—20,40—60 cm 土层间显著提升,在 20—40 cm 土层间变化不显著。在关键点 2,WDOC、LFOC 在 0—60 cm 土层间变化不显著,POC、MOC 在 0—20 cm 土层间显著提升,在 20—60 cm 土层间变化不显著;HFOC 在 0—40 cm 土层间显著提升,在 40—60 cm 土层间变化不显著;MBC 在 20—40 cm 土层间变化显著,在 0—20,40—60 cm 土层间变化不显著。在关键点 3,WDOC、POC、LFOC、MBC 的指标在 0—60 cm 土层间均已达到或超过正常耕地水平;MOC 和 HFOC 在不同土层深度间与正常耕地相比仍有显著差异,恢复周期较长。

2.2.2 土壤碳组分的丰富度分析 运用基于 LSD 差异字母的碳组分丰富度模型: $F(X) = \sum_{i=1}^n X_i$ 。式中: X 为不同的地类(M1~M4); n 为碳组分的种类数(本文是 6); X_i 为 X 地类中第 i 个组分含量后的字母。通过对字母 a~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越好。

结合表 2 数据,用该模型来计算不同复垦周期下土壤在不同土层深度的有机碳组分丰富度,通过对 $a=8, b=7, c=6, \dots, h=1$ (两个字母的则取平均数,如 $ab=7.5$) 进行赋值并计算各分层 F 值和 F 均值(表 3),发现

塌陷地在 0—60 cm 土层及不同深度间的有机碳组分丰富度都远小于正常耕地,随着复垦措施期的完成,土壤有机碳组分丰富度在各土层深度间都有较大提升,随着复垦恢复期年限的增加,有机碳组分丰富度也逐渐增长。当到了 M3 时,研究区在 0—20 cm 土层间的有机碳组分丰富度已经达到正常耕地水平,在 20—60 cm 土层的有机碳组分丰富度仍小于正常耕地。

表 2 不同土层深度间土壤碳组分的空间特征

复垦周期	土层深度/cm	WDOC	POC	MOC	LFOC	HFOC	MBC
M1	0—20	0.44cd	2.68d	7.97d	1.05b	9.31e	0.08d
	20—40	0.32e	1.96f	6.32g	0.77cd	6.79h	0.08d
	40—60	0.27f	1.69g	5.50h	0.61d	6.34h	0.06e
M2	0—20	0.55b	3.87b	9.07c	1.37a	10.45d	0.20a
	20—40	0.39d	2.20e	6.82ef	0.94bc	7.47g	0.12c
	40—60	0.34e	1.78fg	6.64f	0.82c	7.51g	0.13c
M3	0—20	0.60ab	4.12a	9.91b	1.34a	12.32b	0.21a
	20—40	0.42cd	2.21e	7.25e	1.01bc	8.21f	0.15b
	40—60	0.36de	1.98f	6.90ef	0.84c	7.80fg	0.13c
M4	0—20	0.60a	3.16c	12.29a	1.38a	13.64a	0.12c
	20—40	0.46c	2.39e	10.00b	1.04b	11.14c	0.08d
	40—60	0.36de	1.86fg	8.18d	0.81c	9.20e	0.07de

注:采用 LSD 检验,不同字母表示差异明显($P<0.05$)。

2.3 土壤碳层次的演变特征

2.3.1 土壤碳层次的空间特征 通过前人研究^[12]可得,稳定性同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 可以表示土壤的新旧状况,表土层由于新鲜有机质的渗入而表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小,深土层因有机质的积累而表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 偏大。在复垦工作中,土壤层次的保护(尤其是表土的保护性剥离与回填)是一个重要的内容,因为它关系着复垦后作物的长势情况。因而可以用 $\delta^{13}\text{C}$ 值来描述土壤碳层次的变化(图 7)。对比 M1 和 M4 发现,当正常耕地因地下采矿而塌陷时,其耕作层(0—60 cm)的土壤层次并未发生较大变化,在不同深度的土层间,塌陷地的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与正常耕地相比均不存在显著性差

异,且土壤层次明显,变化规律基本一致。在关键点 1,当完成复垦措施期后,土壤碳层次会发生较大的震动, $\delta^{13}\text{C}$ 均值在不同土层深度间的差异会变小。M2

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 M1 相比差异较大,土壤层次差异变得不明显。在关键点 2,随着复垦年限的增长,复垦土壤各土层深度间 $\delta^{13}\text{C}$ 数值变化不显著。

表 3 有机碳组分丰富度 F 值

复垦周期	土层深度/cm	WDOC	POC	MOC	LFOC	HOC	MBC	分层 F 值	F 均值
M1	0—20	5.5	5.0	5.0	7.0	4.0	5.0	31.5	68.0
	20—40	4.0	3.0	2.0	5.5	1.0	5.0	20.5	
	40—60	3.0	2.0	1.0	5.0	1.0	4.0	16.0	
M2	0—20	7.0	7.0	6.0	8.0	5.0	8.0	41.0	91.5
	20—40	5.0	4.0	3.5	6.5	2.0	6.0	27.0	
	40—60	4.0	2.5	3.0	6.0	2.0	6.0	23.5	
M3	0—20	7.5	8.0	7.0	8.0	7.0	8.0	45.5	101.0
	20—40	5.5	4.0	4.0	6.5	3.0	7.0	30.0	
	40—60	4.5	3.0	3.5	6.0	2.5	6.0	25.5	
M4	0—20	8.0	6.0	8.0	8.0	8.0	6.0	44.0	105.5
	20—40	6.0	4.0	7.0	7.0	6.0	5.0	35.0	
	40—60	4.5	2.5	5.0	6.0	4.0	4.5	26.5	

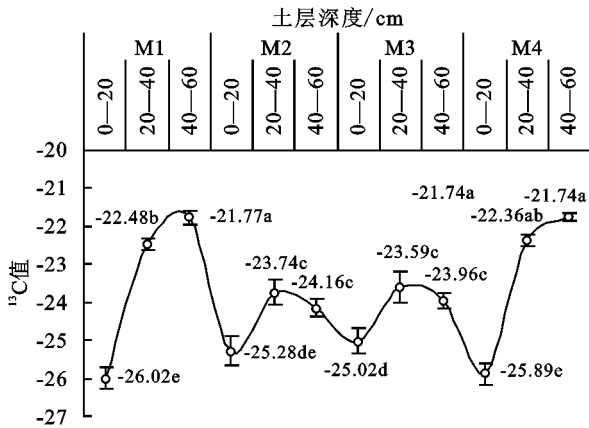


图 7 完整复垦周期内土壤碳层次的空间特征

2.3.2 土壤碳层次的波动特征 由图 7 和表 4 可知,完整复垦周期内土壤碳层次的波动特征十分明显。

表 4 土壤碳层次波动特征

复垦周期	土层深度/cm	平均值	标准差	变异系数	平均值的 95% 置信区间		极小值	极大值
					下限	上限		
M1	0—20	-26.02	0.281	-0.011	-26.37	-25.67	-26.36	-25.72
	20—40	-22.48	0.155	-0.007	-22.67	-22.29	-22.69	-22.31
	40—60	-21.77	0.161	-0.007	-21.97	-21.57	-22.00	-21.61
M2	0—20	-25.28	0.384	-0.015	-25.76	-24.80	-25.84	-24.77
	20—40	-23.74	0.345	-0.015	-24.17	-23.31	-24.22	-23.29
	40—60	-24.16	0.235	-0.010	-24.45	-23.87	-24.45	-23.82
M3	0—20	-25.02	0.344	-0.014	-25.45	-24.59	-25.58	-24.69
	20—40	-23.59	0.407	-0.017	-24.10	-23.08	-24.12	-23.08
	40—60	-23.96	0.211	-0.009	-24.22	-23.70	-24.30	-23.73
M4	0—20	-25.89	0.261	-0.010	-26.21	-25.57	-26.19	-25.57
	20—40	-22.36	0.161	-0.007	-22.56	-22.16	-22.57	-22.20
	40—60	-21.74	0.117	-0.005	-21.88	-21.60	-21.93	-21.63

3 讨论

采煤活动造成土地塌陷会产生一定的坡度,造成土壤养分从坡顶到坡底迁移流失,又在塌陷中心点富集的现象。由于塌陷地中心基本处于积水状态而丧失了耕

M1 和 M4 表现为“高瘦”型,M2 和 M3 表现为“矮胖”型。“高矮”体现在不同深度间均值差异大小,“胖瘦”体现在标准差和变异系数(CV)的差异大小。具体来讲,在 M1 和 M4 中, $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同土层深度中的均值差异较大即振幅较大,这说明该土壤层次较明显。同时发现 M1 和 M4 在 0—20 cm 土层间的标准差和变异系数较大,20—60 cm 土层间的则较小。在 M2 和 M3 中, $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同土层深度中的均值差异较小及振幅较小,说明土壤层次不明显。同时发现 M2 和 M3 在 0—60 cm 土层间的标准差和变异系数明显大于 M1 和 M4,说明未复垦土地(M1 和 M4)的不同土壤层次间的土壤来源一致性较好,复垦地(M2 和 M3)的土壤来源混乱,新老土的区分不显著。

作用,因此可以忽略塌陷中心的养分情况。研究发现,(积水边缘以上的)塌陷地的 TC、SOC、各有机碳组分含量与正常耕地相比显著偏小,土壤养分的减少会造成作物减产等问题,因此土地复垦工作势在必行。

完成复垦措施后的当年(关键点1),复垦土壤中的TC、SOC含量就有了大幅度提升,各有机碳组分也有明显的增加。这是由于土地复垦是一个全方位的工程,起着“节流”和“开源”^[23-24]的作用。“节流”是指土地复垦工作通过填充和平整土地,削弱了坡度对土壤养分造成的流失作用;“开源”是指复垦工作一般会伴随着生态性修复和大量有机肥的施用,这为土壤中养分的储存提供了来源。特别注意的是,虽然复垦土地中SOC的含量与正常耕地相比仍有一定的差距,但是其SCOD在数值上已经达到了正常耕地的水平。这是由于SOCD是由SOC、容重、砾石比等因素决定的,复垦后的土地因过多的机械压实^[1]会造成土壤容重的大幅增加,因而造成SOCD在数值上达到正常耕地的水平,但是这是一种非健康的密度表现。随着复垦恢复期限的逐渐增长(关键点2),TC、SOC和各有机碳组分的含量也在逐年增加,表层的恢复速率较快,深层的恢复速率较慢。这是由于复垦管理工作对土壤的改良作用强度从地表向深层辐射递减造成的。尽管不同指标其完全恢复年限不同(表2),但复垦工作对土壤中碳总量和碳组分的恢复起着十分重要的促进作用。

与土壤碳总量和碳组分的“恢复性”演变不同,复垦工作对土壤层次具有“破坏性”演变:当土地因采矿塌陷时,虽然会造成土壤养分的流失,但 $\delta^{13}\text{C}$ 值在数值和变化趋势上和正常耕地几乎一致,说明土壤层次基本保持稳定。当复垦工作刚完成时(关键点1),由于早期复垦工作无表土剥离或未分层回填,会导致复垦土壤的层次性造成巨大的破坏,且相同层次间土壤来源一致性较差(不同土层深度间的土混合回填所致)。通过对(关键点2)的观察和对(关键点3)的预测,发现复垦工作对土壤层次的破坏是根本性的,短时间内很难恢复到正常耕地的层次水平。建议相关部门在高潜水位矿区进行塌陷地治理时,尽量采用对土层扰动较小的复垦方式,要对表土剥离和回填工序进行优化和监督,以保护复垦土壤的层次尽量少地遭到损伤,从而达到更好的复垦效果。

4 结论

(1)复垦工作会促进“碳汇”作用。塌陷地的TC、SOC、SOCD和各有机碳组分含量较低,经过复垦措施期,SOCD在复垦当年就恢复到正常耕地的水平,TC和SOC含量随着复垦年限增长不断增加。WDOC、POC、LFOC、MBC等组分恢复速率较快,恢复周期较短,MOC和HFOC恢复速率较慢,恢复周期较长。

(2)复垦工作的“碳汇”作用具有辐射递减性。TC、SOC、SOCD和各有机碳组分的恢复速率随着土

层深度的增加逐渐减缓。在表、中土层的恢复速率较快,而在深土层的恢复速率较最慢。此外,土壤有机碳丰富度也逐年增加,且表层恢复速率快于深层。

(3)复垦工作会对土壤层次造成破坏。与对照耕地相比,复垦土壤不同土层深度间的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值差较小,标准差和变异系数偏大。这说明复垦土壤层次不明显,且相同土壤层次间土壤来源混乱,这不利于土壤内环境的改善与恢复。

参考文献:

- [1] 闵祥宇,李新举,李奇超.机械压实对复垦土壤粒径分布多重分形特征的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):274-283.
- [2] 闵祥宇,李新举,刘宁,等.不同复垦方式下土壤无机磷的空间分布特征[J].水土保持学报,2016,30(6):220-225.
- [3] 肖武,李素萃,王铮,等.高潜水位煤矿区生态风险识别与评价[J].生态学报,2016,36(17):5611-5619.
- [4] 闵祥宇,李新举.高潜水位矿区不同复垦方式下土壤热导率及其影响因素[J].水土保持学报,2017,31(3):176-181.
- [5] 付艳华,胡振琪,肖武,等.高潜水位煤矿区采煤沉陷湿地及其生态治理[J].湿地科学,2016,14(5):671-676.
- [6] 李俊颖,李新举,赵跃伦,等.不同复垦方式对煤矿复垦区土壤养分状况的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(2):186-191.
- [7] 金鑫鑫,汪景宽,孙良杰,等.稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J].土壤,2017,49(2):217-224.
- [8] 侯晓静,杨劲松,赵曼,等.不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J].土壤,2014,46(5):780-786.
- [9] Baumgartl T, Glenn V, Erskine P, et al. Spatial and temporal changes of soil organic carbon content since time of reclamation of mine soils in a semi-arid environment of Australia[C]//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts,2016.
- [10] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.
- [11] 李新华,郭洪海,朱振林,等.不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].农业工程学报,2016,32(9):130-135.
- [12] 田丽艳,郎赞超,刘丛强,等.贵州普定喀斯特坡地土壤剖面有机碳及其同位素组成[J].生态学杂志,2013,32(9):2362-2367.
- [13] 徐占军,张绍良,侯湖平.煤炭开采对农田土壤碳储量的影响研究[J].现代矿业,2014,30(7):128-131.
- [14] 渠俊峰,张绍良,李钢,等.高潜水位采煤沉陷区有机碳库演替特征研究[J].金属矿山,2013,42(11):152-153.
- [15] 余健.高潜水位区采煤塌陷地复垦土壤碳库特征[D].北京:中国矿业大学,2014.

- [18] Cambouris A N, Ziadi N, Perron I, et al. Corn yield components response to nitrogen fertilizer as a function of soil texture[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, 96(4): 386-399.
- [19] 范霞, 张吉旺, 任伯朝, 等. 不同株高夏玉米品种的氮素吸收与利用特性[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1830-1838.
- [20] 杜红霞, 吴普特, 冯浩, 等. 氮施用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用效率的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 82-87.
- [21] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296.
- [22] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤 N₂O 排放的影响: 以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [23] 张宏. 半旱地不同栽培模式下小麦—玉米轮作体系作物水肥利用特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [24] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米—大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 474-482.
- [25] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. *核农学报*, 2009, 23(2): 334-340, 307.
- [26] 侯云鹏, 孔丽丽, 秦裕波, 等. 吉林省中部黑土区玉米氮肥效应研究[J]. *玉米科学*, 2012(3): 130-133, 138.
- [27] Zhang X, Bol R, Rahn C, et al. Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980—2014 in Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596: 61-68.
- [28] 吴永成, 王志敏, 周顺利. ¹⁵N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2446-2453.
- [29] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 1020-1028.
- [30] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.

(上接第 203 页)

- [22] Yazawa Y, Asakawa D, Matsueda D, et al. Effective carbon and nitrogen sequestrations by soil amendments of charcoal[J]. *Journal of Arid Land Studies*, 2006, 15(4): 463-467.
- [23] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [24] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.
- [25] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219-246.
- [26] 李春明, 熊淑萍, 赵巧梅, 等. 有机无机肥配施对小麦冠层结构、产量和蛋白质含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4287-4293.
- [27] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008(10): 3133-3139.
- [28] 周江明. 有机—无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 234-240.
- [29] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2809-2819.

(上接第 209 页)

- [16] 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, S232/234(12): 81-87.
- [17] 胡振宏, 何宗明, 范少辉, 等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4205-4213.
- [18] 王芳丽, 高明, 代文才, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 227-232.
- [19] 盛卫星, 吴家森, 徐建春, 等. 不同经营年限对山核桃林地土壤轻重组有机碳的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(5): 803-808.
- [20] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 278-286.
- [21] 郑永红, 胡友彪, 张治国, 等. 煤矿复垦区重构土壤溶解性有机碳空间分布特征[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 977-981.
- [22] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 325-331.
- [23] 梁利宝, 冯鹏艳. 生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 305-308.
- [24] 梁利宝, 闫峰, 许剑敏. 不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 262-266.