

程静霞, 聂小军, 刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2495–2500. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1806  
Cheng Jingxia, Nie Xiaojun, Liu Changhua. Spatial variation of soil organic carbon in coal-mining subsidence areas [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2495–2500. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1806

# 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化

程静霞, 聂小军, 刘昌华

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院 河南 焦作 454000)

**摘要:** 为研究矿区土壤碳动态, 以焦作矿区为例, 分析了沉陷坡与裂缝区两种破坏地表的土壤有机碳空间变化。结果表明: 与未沉陷的矿区土壤相比较, 沉陷坡与裂缝区表土(0~10 cm)有机碳含量降低且空间变异性增大, 土壤剖面各层次有机碳含量均出现降低, 特别是10~30 cm的土壤剖面层有机碳含量降低最明显, 降幅为29%~38%; 两种破坏地表土壤剖面有机碳库损失高达20.8~47.3 t/hm<sup>2</sup>。沉陷坡上, 表土有机碳含量从上坡到中坡明显的降低, 从中坡到坡底逐渐增加; 中坡、下坡与坡底有机碳含量沿土壤剖面层次向下表现出一致的线性下降趋势, 但上坡在土壤剖面内的波动较大; 各坡位土壤剖面有机碳储量均出现损失, 尤其是坡底以上的坡位有机碳储量损失最大。矿区土壤有机碳的空间变化与土壤侵蚀、土地利用、裂隙渗漏及低生物量输入有关。

**关键词:** 有机碳; 矿区土壤; 土壤侵蚀; 采煤沉陷

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)12-2495-06

## Spatial variation of soil organic carbon in coal-mining subsidence areas

CHENG Jing-xia, NIE Xiao-jun, LIU Chang-hua

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to understand carbon dynamics in mine soil, the spatial variation of soil organic carbon (SOC) contents was investigated in two types of landscapes destroyed by coal mining, i. e., subsidence slope and ground fissure site from Jiaozuo mine area, China. It is found that the SOC contents in topsoil (0–10 cm) decreases and their spatial variability increases in both subsidence slope and ground fissure site in comparison with those in non-subsidence site. The SOC contents at all the layers of depth profile decrease, especially at the layers of 10–30 cm depth, where a decrease of 29%–38% in the SOC contents is observed. The depletion of SOC pool in the study area was estimated up to 20.8–47.3 t/hm<sup>2</sup>. For the subsidence slope, the SOC contents in topsoil obviously decrease from upper slope to middle slope positions, and then gradually increased from middle slope to toe slope positions. At the middle, lower and toe slope positions of soil profiles, the SOC contents decrease linearly along with depth, but vary irregularly in those of the upper slope positions. The loss of SOC storages occurs on the whole subsidence slope, especially at the upper, middle and lower slope positions. The spatial variation patterns of SOC in the study area could be attributed to soil erosion, land-use and fissure-induced leakage as well as the low input of crop biomass to mine soils.

**Key words:** organic carbon; mine soils; soil erosion; coal-mining subsidence

煤炭作为我国最主要的能源, 在推动国民经济快速发展的同时, 其开采也带来了一系列严重的问题,

诸如土地退化、环境污染及粮食安全风险。随着我国耕地资源日趋紧张, 矿区土地退化问题备受关注。目

收稿日期: 2013-12-06 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(U1261206); 国家自然科学基金资助项目(41001157)

作者简介: 程静霞(1988—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生。E-mail: cjx108cz@126.com。通讯作者: 聂小军(1977—), 男, 山西曲沃人, 副教授, 博士。E-mail: niexj2005@126.com

前的研究主要从土壤理化特性、水土环境演变 2 个方面探讨开采沉陷对矿区土地退化的影响<sup>[1-7]</sup>。作为人类干扰强烈的矿区农业土壤,其质量退化引起的粮食安全风险近年来逐渐被重视,相应的矿区土地整治工作正在渐次开展;但是,与气候变化相关的矿区土壤碳动态却很少被关注。有机碳在全球碳循环中处于核心地位<sup>[8]</sup>。在全球陆地生态系统中,土壤作为最大的有机碳库,碳储量高达  $1.55 \times 10^{12}$  t<sup>[9]</sup>,是大气与生物量碳库总和的 2 倍<sup>[10-11]</sup>。在人类社会农业文明的漫长发展过程中,绝大部分农业土壤受强烈人为干扰活动而使其有机碳库相较于农业文明前已经损失了 25%~75%<sup>[12]</sup>。农业土壤有机碳库的微小变动即可导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度的较大变化,从而影响全球气候变化<sup>[11,13-14]</sup>。大量的研究探讨了土地利用变化、土壤侵蚀、植被退化、土壤管理等干扰因素对草地、森林、湿地、耕地等农业土壤有机碳的影响<sup>[15-23]</sup>,从而为区域农业土壤有机碳库的评价提供了理论支持。对于矿区土壤这种特殊的农业土壤来说,影响其有机碳动态的因素极其复杂。地表破坏、土地利用、植被退化、土壤侵蚀等干扰因素均有可能影响矿区土壤有机碳的空间分布。然而,目前有关矿区土壤有机碳动态这方面研究开展的还很少,这不利于以采矿业为主的区域农业土壤有机碳库的准确评价。

基于以上背景,笔者以焦作矿区为例,选取有代表性的采煤沉陷区,调查沉陷坡与裂缝区两种破坏地表的土壤有机碳空间分布,分析土壤有机碳空间变化的影响因素,以期对矿区有机碳管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

焦作矿区(112.53°~113.63°E,34.8°~35.5°N)位于河南省北部,地处太行山南麓,区域地貌为山前冲洪积扇平原。该矿区属于温带区大陆性季风气候,年均

气温 14℃,年均降雨量 695.7 mm,蒸发量 2 039 mm;降雨量集中在 7—9 月,占全年雨量的 70%。矿区从 20 世纪初开始规模开发,目前采煤沉陷区面积高达 149 km<sup>2</sup>,沉陷坡度 $\leq 8^\circ$ ,局部破坏严重,地表上的裂缝宽度多在 20 cm 左右<sup>[24]</sup>。采煤沉陷区土地利用类型主要为耕地与林地,耕地作物循环为小麦(*Triticum aestivum* L.)—玉米(*Zea mays* L.)。林地乔木基本上为单一的毛白杨(*Paulownia tomentosa*)。土壤类型为石灰性褐土,母质是石灰岩和第四系砂砾石。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

在焦作矿区选取一个有代表性的、具有 15 a 沉陷历史的井工开采破坏地表作为研究区,沉陷地表的类型包括沉陷坡(局部分布一些小裂缝,但已经被人工简单填补)和大裂缝集中分布区(裂缝区)。沉陷坡与裂缝区 0~10 cm 土壤质地均为粉壤土(43% 砂粒,50% 粉粒,7% 黏粒)。沉陷坡、裂缝区的土地利用类型分别为耕地、林地,面积分别为 0.8 和 1.5 hm<sup>2</sup>,地表平均坡度分别为 3.04°和 1.26°。由于地表沉陷,沉陷坡与裂缝区土地已变为旱地。同时,选取沉陷坡与裂缝区附近一块平整的、未沉陷的、旱作耕地作为对照区,其土壤质地也为粉壤土(41% 砂粒,52% 粉粒,7% 黏粒)。沉陷坡与对照区耕地作物残茬管理一致,均为小麦收割后保留 30 cm 高度的秸秆,玉米秸秆全部保留,但是由于作物长势不同,沉陷坡耕地作物生物量仅为未沉陷耕地作物生物量的 50% 左右。裂缝区种植杨树,自沉陷以来前 10 a 由于生长不良,林木最大胸径(地表以上 1.3 m 处)不超过 12 cm,随后全部被采伐,目前为具有 5 a 栽植历史的杨树幼林地。沉陷坡、裂缝区、对照区的土壤基本属性见表 1。

表 1 采煤地表破坏区情况及其土壤属性

Table 1 Status of destroyed landscapes and selected soil properties in mining area

类型	面积/ hm <sup>2</sup>	坡度/ (°)	土地利 用情况	土壤剖面 厚度/cm	剖面密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	剖面 pH 值	0~10 cm 土壤质地 (砂粒/粉粒/黏粒)
沉陷坡	0.8	3.04	耕地	40~50	1.23~1.75	8.21~8.45	粉壤土(44/49/7)
裂缝区	1.5	1.26	林地	30	1.28~1.67	8.14~8.48	粉壤土(41/53/6)
对照区	0.8	0	耕地	50	1.20~1.48	8.17~8.42	粉壤土(41/52/7)

用取土钻( $\phi=8$  cm)采样,具体的采样方案:①沉陷坡的土样采集点分布如图 1(a)所示,在上、中、下、坡底位置均按之字形布点,每个坡位设置 7 个样点,其中 3 个为剖面点,剖面点分 5 层采集,即 0~10,10~20,20~30,30~40,40~50 cm;其余 4 个点

采集 0~10 cm 的表土。沉陷坡总计采样 76 个。②裂缝区沿 2 条主要的裂缝走向布点(图 1(b)),共布设 15 个点,其中 4 个剖面点,剖面点分 3 层取样:0~10,10~20,20~30 cm;其余 11 个点采集 0~10 cm 的表土。裂缝区总计采集 23 个样品。③对照区样点按照

图 1 (c) 进行均匀布设, 共布设 9 个样点, 其中 6 个土壤表层(0~10 cm) 样点, 3 个为剖面点, 剖面点分 5 层采集: 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm; 总计采集 21 个样品。利用 DGPS 对每个样点的坐标及海拔进行测定。样品采集结束, 带回实验室测定。

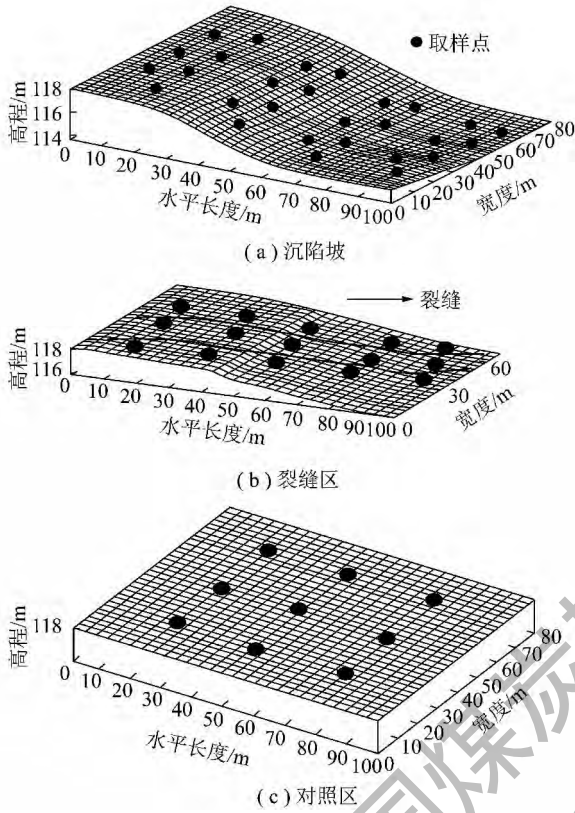


图 1 沉陷区取样点分布  
Fig. 1 Soil sampling in study area

2.2 实验分析及数据处理

吸管法测颗粒组成、电位法测 pH 值(水土质量比为 1: 2.5), 环刀法测土壤密度, 重铬酸钾浴外加热法测土壤有机碳<sup>[25]</sup>。所有测定数据采用 SPSS

19.0 软件进行统计分析。不同位置间土壤有机碳含量的比较采用 ONE-ANOVA 单因素方差法来分析。用于比较不同位置表土有机碳含量差异的样本数: 沉陷坡 28 个, 裂缝区 15 个, 对照区 9 个; 用于比较不同位置土壤剖面各层次有机碳含量及有机碳储量差异的样本数: 沉陷坡 12 个, 裂缝区 4 个, 对照区 3 个; 用于比较沉陷坡不同坡位表土有机碳含量差异的样本数为 7 个/坡位; 用于比较沉陷坡不同坡位土壤剖面各层次有机碳含量及有机碳储量差异的样本数为 3 个/坡位。剖面土壤有机碳储量为

$$SSOC = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i D_i SOC_i}{100} \quad (1)$$

式中, SSOC 为土壤有机碳储量, kg/m<sup>2</sup>; Q<sub>i</sub> 为 i 层土壤密度, g/cm<sup>3</sup>; D<sub>i</sub> 为 i 层土壤深度, cm; SOC<sub>i</sub> 为 i 层土壤有机碳含量, g/kg; n 为土壤总层数。

3 结果与讨论

3.1 表层土壤有机碳空间变化

沉陷坡表层土壤有机碳含量平均为 11.55 g/kg, 明显低于裂缝区表层土壤有机碳含量(13.01 g/kg) (P<0.05)。与对照区(14.18 g/kg) 相比较, 沉陷坡表层土壤有机碳含量明显降低了 19% (P<0.05), 但裂缝区表层土壤有机碳含量降低不明显 (P>0.05), 这主要归因于裂缝区土地利用类型为林地, 林地凋落物增加的土壤有机质在一定程度上弥补了沿裂隙通道损失的表土有机碳。从空间变异性来看, 沉陷坡与裂缝区表层土壤有机碳含量的变异系数(CV) 分别为 19% 与 14%, 远高于对照区(6%) (表 2)。这些结果与 Ussiri and Lai<sup>[26]</sup> 的研究结论一致, 表明煤炭开采造成的地表破坏导致表土有机碳含量的降低与空间变异性增大。

表 2 不同破坏位置表层土壤有机碳含量

Table 2 Organic carbon contents in surface soils of different destroyed landscapes

g/kg

对照区	沉陷坡				裂缝区
	上坡	中坡	下坡	坡底	
14.18 ± 0.92a	12.46 ± 1.09a	9.79 ± 2.70b	11.20 ± 1.31ab	12.68 ± 1.96a	13.01 ± 1.78a

注: a, b, c 为 0.05 差异显著性(下同); 沉陷坡表层土壤有机碳含量平均为(11.55 ± 2.15b) g/kg。

沉陷坡表层土壤有机碳坡面分布规律表现为: 表土有机碳含量从上坡到中坡呈现出明显的降低, 然后, 从中坡到坡底逐渐增加, 但与对照区相比, 沉陷坡面范围内表土有机碳含量都是减小的(表 2)。坡底(12.68 g/kg) 与上坡(12.46 g/kg) 2 个位置的表土有机碳含量最高, 且相差不大 (P>0.05)。相反, 中坡(9.79 g/kg) 与下坡(11.20 g/kg) 表土有机碳含量较

低; 特别是中坡表现出最低的表土有机碳含量, 明显低于坡底与上坡的表土有机碳含量 (P<0.05)。研究区沉陷坡表土有机碳含量表现出的这种坡面分布规律有别于朱宗泽的研究结果, 即沉陷坡表土有机碳含量往往被发现是从坡顶到坡底逐渐增加<sup>[27]</sup>。然而, 在本研究中, 表土有机碳含量是从中坡到坡底逐渐增加, 也即有机碳的明显损失最先发生在中坡位

置。中坡与下坡 2 个位置表土有机碳含量低与土壤侵蚀有关。通过调查,发现沉陷坡上的土壤黏粒( $< 0.002 \text{ mm}$ )含量从上坡到坡底逐渐增大(图 2),这表明水蚀对土壤颗粒的分选性搬运过程。根据坡面侵蚀理论,水蚀的发生坡位主要在中坡与下坡,因为这两个位置是坡面径流汇集的场所<sup>[28]</sup>。而且,沉陷坡的中坡位置坡曲率变化较大,在耕作位移作用下可以诱发明显的耕作侵蚀(在耕作工具作用下土壤发生的向下坡传输)<sup>[29]</sup>。据此推断,土壤侵蚀导致了中坡与下坡两个位置的表土有机碳损失。坡底由于接受来自上坡方向的侵蚀土壤,结果导致该位置表土有机碳含量最高。但是,与没有土壤补给来源的上坡( $12.46 \text{ g/kg}$ )比较,坡底( $12.68 \text{ g/kg}$ )表土有机碳含量并没有表现出明显的增加。这与坡底存在的一些小裂缝有关。下文“沉陷坡土壤剖面有机碳含量深度分布格局(图 3)”显示:坡底土壤 30~50 cm 深度范围内的有机碳含量明显高于其他坡位相同土壤深度的有机碳含量,这表明坡底表土有机碳存在沿裂缝通道渗漏到深层土壤而产生损失。另外,研究中发现的中坡表土有机碳含量明显低于其他坡位,这个结果也不同于顾和和等的研究报道<sup>[2]</sup>。在他们的研究中,沉陷坡中坡表土有机碳含量也被发现最低,但与上坡、下坡与坡底表土有机碳含量并无显著差异( $P > 0.05$ )。这种结果的不一致性可能归因于中坡位置土壤侵蚀强度的差异,即在他们的调查中,中坡土壤侵蚀程度轻微,而在笔者的研究调查中,中坡水蚀与耕作侵蚀联合作用导致的土壤侵蚀强度较高。

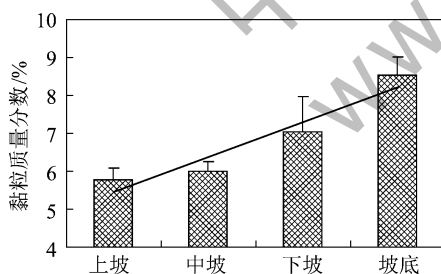


图 2 沉陷坡土壤黏粒分布

Fig. 2 Distribution of clay contents across the subsidence slope

### 3.2 土壤有机碳剖面分布

图 4 显示了沉陷坡与裂缝区有机碳在土壤剖面内的含量变化。总体上,沉陷坡与裂缝区有机碳含量随着土壤剖面层次的加深呈现出降低的趋势,这些趋势类似于对照区土壤有机碳含量的剖面变化。但是,不同于对照区的是沉陷坡与裂缝区土壤剖面各层次的有机碳含量均较低;其中,10~30 cm 的土壤剖面层有机碳含量降幅最大,分别下降 29%~31% 与 31%~38%。这表明煤炭开采造成的地表破坏导致

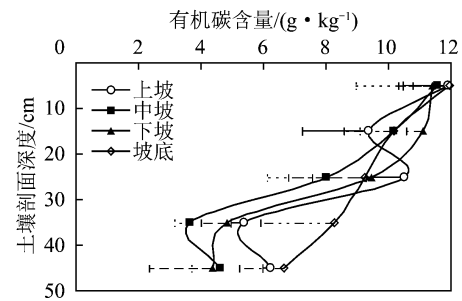


图 3 沉陷坡土壤剖面有机碳含量深度分布格局

Fig. 3 Depth distribution of organic carbon contents in soil profile for different positions of the subsidence slope

土壤剖面各层次的有机碳含量降低,特别是 10~30 cm 的土壤剖面层有机碳含量降低最为明显。其次,沉陷坡与裂缝区两种破坏地表的 0~10 cm 土壤剖面层有机碳含量最高,明显高于 10 cm 以下各层次的有机碳含量( $P < 0.05$ ),这种特征不同于对照区,对照区有机碳含量最高的土壤剖面层表现为 0~30 cm (0~10, 10~20, 20~30 cm 层次间有机碳含量无显著差异; $P > 0.05$ )。这种不同可能是由于沉陷坡与裂缝区表土(0~10 cm)有机碳分别受地表侵蚀与垂直渗漏作用而无法在 10~30 cm 的土壤剖面层内有效积累。

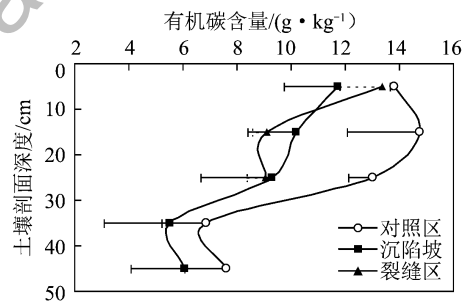


图 4 不同破坏地表土壤剖面有机碳含量深度分布格局

Fig. 4 Depth distribution of organic carbon contents in soil profile for different types of destroyed landscapes

中坡与下坡土壤有机碳含量表现出一致的剖面变化规律,即在 0~40 cm 的剖面层内,随着剖面层次的加深,土壤有机碳含量逐渐降低;而在 40~50 cm 的剖面层,有机碳含量变化不明显。坡底有机碳含量在整个剖面层随着土壤深度的增大呈现出很好的线性下降趋势。上坡土壤有机碳含量在 0~10 cm 与 20~30 cm 的剖面层含量接近且最高( $P > 0.05$ ),而在其他剖面层明显降低( $P < 0.05$ )(图 3)。显然,上坡与坡底有机碳剖面变化不同于中坡与下坡。对于坡景观而言,虽然上坡地表径流难以汇集,水蚀对土壤有机碳的搬运影响不明显,但该坡位由于在耕作传输作用下表现为土壤净输出,因此也是耕作侵蚀一个主要发生场所<sup>[30]</sup>。在研究区,土壤耕作采用机械耕

作 耕作深度在 20 cm 左右,这种耕作实践导致 10 ~ 20 cm 深度的土壤有机碳明显损失,同时,由于该上坡位置坡度(0.94°)较缓,从而表现出类似于未沉陷耕地 CK 在 20 ~ 30 cm 与 0 ~ 10 cm 土壤层相近的有机碳含量(图 4)。另外,坡底土壤有机碳含量线性降低的剖面变化与地表以下的潜在小裂缝使土壤各剖面层有机碳沿裂隙通道均匀渗漏有关。

### 3.3 土壤剖面有机碳储量

表 3 显示了沉陷坡与裂缝区土壤剖面有机碳的储量(kg/m<sup>2</sup>)。与对照区 CK(8.58 kg/m<sup>2</sup>)相比,沉陷坡(6.50 kg/m<sup>2</sup>)、裂缝区(3.85 kg/m<sup>2</sup>)土壤剖面有机碳储量显著降低( $P < 0.05$ ),分别降低了 24% 与

55% 损失量分别高达 20.8 与 47.3 t/hm<sup>2</sup>,这些数值接近世界最严重退化土壤的有机碳库损失(30 ~ 40 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[31]</sup>。沉陷坡不同坡位土壤剖面有机碳储量的变化表现为:上坡、中坡与下坡的土壤剖面有机碳储量无明显变化( $P > 0.05$ ),均显著低于坡底( $P < 0.05$ ),表明沉陷坡土壤剖面有机碳储量的严重损失主要来源于上坡到下坡的坡位。尽管坡底土壤剖面有机碳储量(8.05 kg/m<sup>2</sup>)相对较高,但相较于对照地(8.58 kg/m<sup>2</sup>)仍呈现出轻微降低的变化(表 3),这暗示作为矿区土壤沉积场所的坡底(或沉陷盆地中心),其土壤有机碳储量并未增加,其主要原因同样是由于地表以下潜在裂隙导致的有机碳渗漏。

表 3 不同破坏位置土壤剖面有机碳储量

Table 3 Organic carbon storages in profile soils of different destroyed positions

kg/m<sup>2</sup>

对照区	沉陷坡				裂缝区
	上坡	中坡	下坡	坡底	
8.58 ± 0.96a	6.42 ± 0.57b	5.61 ± 1.78bc	5.92 ± 0.94bc	8.05 ± 0.11a	3.85 ± 0.67c

注:沉陷坡土壤剖面有机碳储量的平均值为(6.50 ± 1.09b) kg/m<sup>2</sup>。

另外,结合前面结果(沉陷坡表土有机碳 19% 的明显损失与裂缝区表土有机碳的不明显损失)来看,沉陷坡、裂缝区这两种采煤破坏地表的土壤剖面有机碳损失更为严重。沉陷坡土壤剖面有机碳储量的严重降低不仅与土壤侵蚀有关,而且也与该破坏地表作物(小麦-玉米)的生物量低有关。由于沉陷坡耕地作物生物量仅为未沉陷耕地作物生物量的 50% 左右,因此,在相同的作物残茬管理下(小麦收割后保留 30 cm 高度的残茬,玉米秸秆全部保留),沉陷坡耕地有机残体输入到土壤中的数量明显低于未沉陷耕地。裂缝区土壤剖面有机碳储量的降低最严重,这主要归因于裂隙渗漏导致的土壤严重损失,结果导致裂缝区林地土壤剖面厚度仅为 30 cm,远低于未沉陷耕地及沉陷坡耕地的土壤剖面厚度(50 cm)。

## 4 结 论

(1) 沉陷坡与裂缝区表土有机碳含量降低且空间变异性增大。沉陷坡表土有机碳剖面分布规律表现为:表土有机碳含量从上坡到中坡呈现出明显的降低,从中坡到坡底逐渐增加;但与对照区相比,沉陷坡范围内表土有机碳含量都是减小的;其中,土壤侵蚀导致的中坡表土有机碳损失明显。

(2) 沉陷坡与裂缝区有机碳含量沿土壤剖面层次向下而下降,剖面各层次的有机碳均出现损失,特别是 10 ~ 30 cm 的土壤剖面层有机碳损失最明显。沉陷坡不同坡位之间土壤有机碳含量剖面分布规律

表现不一:中坡、下坡与坡底有机碳含量均表现出剖面层次线性下降的趋势;但是,上坡有机碳含量在土壤剖面内波动大。沉陷坡不同坡位间土壤有机碳含量剖面变化差异与土壤侵蚀、裂隙渗漏有关。

(3) 土壤侵蚀、作物残茬量低导致的沉陷坡土壤剖面有机碳库损失与裂隙渗漏导致的裂缝区土壤有机碳库损失均很严重,接近世界最严重退化土壤的有机碳库损失。

### 参考文献:

- [1] 陈龙乾,邓喀中,赵志海,等. 开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J]. 煤炭学报, 2004, 22(6): 586-590.  
Chen Longqian, Deng Kazhong, Zhao Zhihai, et al. Space variation law of physical characteristics about farmland soil due to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 22(6): 586-590.
- [2] 顾和和,胡振琪,刘德辉,等. 高潜水位地区开采沉陷对耕地的破坏机理研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 522-524.  
Gu Hehe, Hu Zhenqi, Liu Dehui, et al. Mechanism of farmland damage due to mining subsidence in the region with high level of subsurface water[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 522-524.
- [3] 张发旺,侯新伟,韩占涛. 煤矿开发引起水土环境演化及其调控技术[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 345-350.  
Zhang Fawang, Hou Xinwei, Han Zhantao. Water-soil environmental evolution induced by coal mining and its regulating and controlling techniques[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(4): 345-350.
- [4] 顾和和,胡振琪,刘德辉,等. 开采沉陷对耕地生产力影响的定量评价[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(4): 414-417.  
Gu Hehe, Hu Zhenqi, Liu Dehui, et al. Quantitative evaluation of im-

- part of mining subsidence on farmland productivity [J]. Journal of China University of Mining & Technology ,1998 ,27(4) :414 - 417.
- [5] 张发旺,侯新伟,韩占涛,等.采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术[J].地理与地理信息科学,2003,19(3):67-70.  
Zhang Fawang,Hou Xinwei,Han Zhantao,et al. Impact of coal mining subsidence on soil quality and some protecting technique for the soil quality [J]. Geography and Geo-Information Science ,2003 ,19(3) :67 - 70.
- [6] 孙泰森,师学义,杨玉敏,等.五阳矿区采煤塌陷地复垦土壤的质量变化研究[J].水土保持学报,2003,17(4):35-37,89.  
Sun Taisen,Shi Xueyi,Yang Yumin,et al. Changes of reclaimed soil quality on subsided land resulting from coal-mine at Wuyang area [J]. Journal of Soil and Water Conservation ,2003 ,17(4) :35 - 37 , 89.
- [7] 杜涛,毕银丽,邹慧,等.地表裂缝对沙柳根际微生物和酶活性的影响[J].煤炭学报,2013,38(12):2221-2226.  
Du Tao,Bi Yinli,Zou Hui,et al. Effects of surface cracks caused by coal mining on microorganisms and enzyme activities in rhizosphere of *Salix psammophila* [J]. Journal of China Coal Society ,2013 ,38(12) :2221 - 2226.
- [8] Batjes N H. Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe [J]. Soil Use and Management ,2002 ,18(3) :324 - 329.
- [9] Lal R. Carbon sequestration [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences ,2007 ,363:815 - 830.
- [10] Bellamy P H,Loveland P J,Bradley R I,et al. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978 - 2003 [J]. Nature ,2005 ,437:245 - 248.
- [11] Wang L,Okun G S,Caylor K K,et al. Spatial heterogeneity and sources of soil carbon in southern African savannas [J]. Geoderma ,2009 ,149(3) :402 - 408.
- [12] Editorial. Farming carbon [J]. Soil & Tillage Research ,2007 ,96:1 - 5.
- [13] 侯湖平,张绍良,丁忠义,等.煤矿区土地利用变化对生态系统植被碳储量的影响——以徐州垆城矿为例[J].煤炭学报,2013,38(10):1850-1855.  
Hou Huping,Zhang Shaoliang,Ding Zhongyi,et al. Impact on vegetation carbon storage in ecosystem from land use change in coal mine area: A case study at Chacheng Mine in Xuzhou mining area [J]. Journal of China Coal Society ,2013 ,38(10) :1850 - 1855.
- [14] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems ,2008 ,81(2) :169 - 178.
- [15] Wang Genxu,Qian Ju,Cheng Guodong,et al. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication [J]. The Science of the Total Environment ,2002 ,291(1) :207 - 217.
- [16] Nie Xiaojun,Wang Xiaodan,Liu Suzhen,et al. <sup>137</sup>Cs tracing dynamics of soil erosion,organic carbon and nitrogen in sloping farmland converted from original grassland in Tibetan plateau [J]. Applied Radiation and Isotopes ,2010 ,68(9) :1650 - 1655.
- [17] 聂小军,刘淑珍,刘海军,等.藏东横断山区草地利用变化对土壤质量的影响[J].山地学报,2009,27(6):676-682.  
Nie Xiaojun,Liu Shuzhen,Liu Haijun,et al. Impacts of grass land-use change on soil quality in the Hengduan Mountain Region, eastern Tibet [J]. Journal of Mountain Science ,2009 ,27(6) :676 - 682.
- [18] Baritz R,Seufert G,Montanarelli L,et al. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe [J]. Forest Ecology and Management ,2010 ,260:262 - 277.
- [19] Van Noordwijk M,Cerri C,Woomer P L,et al. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone [J]. Geoderma ,1997 ,79(1) :187 - 225.
- [20] Wang J Y,Song C C,Wang X W,et al. Changes in labile soil organic carbon fractions in wetland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China [J]. Catena ,2012 ,96:83 - 89.
- [21] Liu S G,Tan Z X,Li Z P,et al. Are soils of Iowa USA currently a carbon sink or source? Simulated changes in SOC stock from 1972 to 2007 [J]. Agriculture ,Ecosystems & Environment ,2011 ,140(1) :106 - 112.
- [22] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context [J]. European Journal of Agronomy ,2004 ,20:229 - 236.
- [23] Nie Xiaojun,Zhang Jianhui,Su Zhengang. Dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in relation to water erosion and tillage erosion [J]. Plos One ,2013 ,8(5) :e64059.
- [24] 张森林,杨书民,张大志,等.焦作市典型煤矿塌陷区地质灾害危险性分析及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):57-59.  
Zhang Senlin,Yang Shumin,Zhang Dazhi,et al. Assessment and countermeasure of geological hazard in a typical coal-mined collapse area in Jiaozuo City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control ,2010 ,21(1) :57 - 59.
- [25] 张甘霖,龚子同.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社,2012:8-49.
- [26] Ussiri D A N,Lai R. Method for determining coal carbon in the reclaimed mine soils contaminated with coal [J]. Soil Science Society of America Journal ,2008 ,72(1) :231 - 237.
- [27] 朱宗泽,陈志超,郝成元.采煤沉陷区土壤成分变化研究——以潞安集团王庄煤矿为例[J].中国水土保持,2011(4):44-46.  
Zhu Zongze,Chen Zhichao,Hao Chengyuan. Analysis on changes of soil components in coal-mining subsidence areas taking Wang-zhuang mine area in Lu'an group for example [J]. Soil and Water Conservation in China ,2011(4) :44 - 46.
- [28] Govers G,Lobb D A,Quine T A. Tillage erosion and translocation: Emergence of a new paradigm in soil erosion research [J]. Soil Till. Res. ,1999 ,51:167 - 174.
- [29] Lobb D A,Kachanoski R G. Modelling tillage erosion on the topographically complex landscapes of southwestern Ontario [J]. Soil & Tillage Research ,1999 ,51:261 - 277.
- [30] Zhang J H,Quine T A,Ni S J,et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion [J]. Global Change Biology ,2006 ,12:1834 - 1841.
- [31] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science ,2004 ,304:1623 - 1627.