

# 采煤塌陷区土壤碳储量变化及其影响因素分析

史娜娜<sup>1</sup>, 韩煜<sup>1</sup>, 王琦<sup>1</sup>, 寇许<sup>2</sup>, 全占军<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中煤科工集团 北京华宇工程有限公司, 北京 100120)

**摘要:**采用因子分析、相关分析等方法揭示大柳塔矿区采煤塌陷前后土壤碳储量的变化及其影响因素。结果表明: (1) 在不同土层深度上, 土壤碳储量含量差异不显著( $p < 0.05$ ), 但在空间分布上差异显著。(2) 在不同坡位上, 对照区和沉降区均表现出坡底 > 坡中 > 坡顶的规律, 采煤塌陷对坡底部位的土壤碳储量影响差异显著( $p < 0.05$ )。(3) 土壤碳储量与土壤孔隙度、全氮、有机质均呈显著正相关, 相关系数分别为 0.943, 0.864, 0.967 ( $p < 0.01$ ), 并且, 主导影响因子为土壤有机质和土壤孔隙度。

**关键词:**采煤塌陷; 土壤碳储量; 方差分析; 因子分析; 半干旱区

**中图分类号:** S153

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)06-0144-05

## Effects of Mining Subsidence on Soil Carbon Storage in the Semi-arid Area

SHI Nana<sup>1</sup>, HAN Yu<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, KOU Xu<sup>2</sup>, QUAN Zhanjun<sup>1</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., CCTEG, Beijing 100120, China)

**Abstract:** Variance analysis and factor analysis were used to reveal effects of mining subsidence on soil carbon storage in Daliuta mining area. The results showed that: (1) at different soil depths, soil carbon storages had no significant difference ( $p < 0.05$ ), but significantly different in spatial distribution; (2) at different slope positions, both in control area and subsidence area, carbon storages showed the same pattern: slope bottom > slope middle > slope top, mining subsidence had the great impact on soil carbon storage of slope bottom according to variance analysis ( $p < 0.05$ ); (3) in coal mining subsidence, soil carbon storage was positively related to soil porosity, total nitrogen, and soil organic matter, respectively, with the correlation coefficients: 0.943, 0.864 and 0.967 ( $p < 0.01$ ), and the dominant factors were soil organic matter and soil porosity.

**Keywords:** mining subsidence; soil carbon storage; variance analysis; factor analysis; semi-arid area

土壤圈具有陆地生态系统最大的碳库, 是大气碳库的 2 倍, 陆地植被碳库的 2~3 倍。由于土壤碳储量巨大, 其较小幅度的变化就可明显影响到土壤碳向大气的排放, 因而在全球碳循环中至关重要, 影响全球气候变化过程、陆地生态系统的结构和功能。土壤碳一方面直接影响着全球碳平衡; 另一方面, 土壤碳可以改善土壤结构, 提高土壤肥力, 是植物和各种微生物的重要可利用碳源, 对于其生长和活动具有重要影响<sup>[1-2]</sup>。因此, 它一直是土壤领域研究的热点问题之一。

采煤塌陷引起一系列的地质环境问题, 如地表塌陷、形成地表移动盆地、产生地裂缝、引起地下水位上升、改变土壤结构、养分及理化性状等<sup>[3-4]</sup>。采煤塌陷地的存在具有普遍性, 而我国耕地面积少, 土地资源

严重不足, 因此, 采煤塌陷地的综合利用与生态恢复重建工作具有重要意义。已有研究多局限于采煤地表沉降引起的地形地貌改变<sup>[4-6]</sup>、土壤理化性质变化<sup>[7-9]</sup>, 以及群落多样性变化等<sup>[10-11]</sup>。不同学者因地貌类型及研究尺度的不同, 研究结论差异较大。采煤塌陷对土壤碳库的扰动是煤炭开采生态影响研究的热点之一, 已有研究对采煤塌陷这种强烈扰动下土壤碳储量变化特征及其影响因素缺乏认识, 特别是在西北半干旱地区, 生态系统脆弱, 土壤是生态系统可持续发展的物质基础<sup>[12]</sup>, 土壤元素的循环与平衡<sup>[13-14]</sup>, 特别是土壤碳的变化, 直接影响着生态系统的结构稳定和功能发挥, 导致不能从根本上对半干旱采煤沉降区的生态修复问题提出实质措施。因此, 本文以陕西省神木县大柳塔矿区为例, 分析采煤塌陷前后土壤碳

储量的变化,继而采用因子分析提炼引起其变化的影响因素,在此基础上,采用相关分析和回归分析揭示二者之间的关系,以期采煤塌陷区土壤改良和土地资源利用提供参考。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验样地情况

试验研究样地选择在大柳塔矿区,该区位于乌兰木伦河流域煤炭资源开发最强烈的地区,行政区划上属于陕西省神木县,东经  $109^{\circ}33'—110^{\circ}10'$ ,北纬  $39^{\circ}01'—39^{\circ}30'$ ,北有毛乌素沙地,南有黄土高原,是风沙地貌向黄土丘陵地貌的过渡带,同时也是典型草原向荒漠草原过渡的半干旱地带。这一地区属于暖温带典型草原区,代表群系为本氏针茅草原。区内海拔  $900—1\,200\text{ m}$ ,年蒸发量高达  $1\,753.8\text{ mm}$ ,年平均降水量  $362\text{ mm}$ ,主要集中在  $6—9$  月份,年际与年内降水分配极不均匀。研究区地带性土壤为淡栗钙、栗钙土和灰钙土,由于风蚀沙化严重,沙丘、沙梁、滩地相间分布。硬梁地以针茅(*Stipa capillata* Linn.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)以及禾本科(*Poaceae*)植物为主;流沙地以沙蒿(*Artemisia desteriorum* Spreng)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)等为建群种。

该区煤炭资源储量丰富,煤矿开采与生态保护之前的矛盾日益突出,属于典型的生态脆弱区,目前尚缺乏对该区采煤塌陷后土壤碳储量内在变化机制的研究。为分析采煤塌陷对该区土壤碳储量的影响,本文选择一处沉陷区为研究对象,同时,选择与沉陷地剖面状况一致但未受沉陷影响的坡地作为对照区。

### 1.2 土壤样本采集及处理

在已选定的沉陷区及对照区进行土壤样品采集工作。在沉陷区和对照区分别选择一个典型坡面(坡向、坡度及坡面结构相似),在坡面的坡顶、坡中、坡底分别设置 3 个  $10\text{ m}\times 10\text{ m}$  样方,每个样方内再随机设置 3 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  的小样方。每个样方内除去枯枝落叶层后,以梅花形选取 5 个点,用土钻按  $0—10$ 、 $10—20$ 、 $20—30$ 、 $30—40$ 、 $40—50$ 、 $50—60\text{ cm}$  分层采集土壤样品,将采集的土样分层混合,密封后带回实验室内,仔细除去其中可见植物残体及土壤动物,一部分风干,一部分  $-10^{\circ}\text{C}$  冷冻保存。每期土壤样品数量为 270 个。

### 1.3 测定方法与数据处理

#### 1.3.1 测定方法

(1) 土壤物理指标:土壤含水量采用烘干法,土壤孔隙度采用土壤密度换算法。

(2) 土壤化学指标:有机质测定采用容量法,全氮测定采用开氏法,速效氮测定采用减解扩散法,全磷测定采用酸溶—钼锑抗比色法,速效磷测定采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提—钼锑抗比色法,全钾测定采用  $\text{HF}$  消解—火焰光度计法,速效钾测定采用  $\text{NH}_4\text{COOH}$  浸提—火焰光度计法。

(3) 土壤生物指标:土壤脲酶采用比色法,蔗糖酶采用 3,5—二硝基水杨酸比色法,过氧化氢酶测定采用高锰酸钾滴定法。

(4) 土壤碳采用元素分析仪进行测试,利用酸化后的土壤样品中的无机碳转化为二氧化碳,在富含氧气的载气中加热酸化后的土壤样品至  $900^{\circ}\text{C}$  以上,有机碳被氧化为二氧化碳的原理,进行土壤碳的测定。

(5) 土壤碳储量计算模型。土壤碳储量是指区域范围内  $1\text{ m}$  深度的土壤有机碳总质量,单位为  $\text{kgC}$ 。土壤碳储量计算模型:

$$\text{SOC}_{\text{den}} = \text{SOC} \times \gamma \times h \times (1 - \delta_{2\text{mm}}) / 100$$

$$\text{SOC}_{\text{tden}} = \text{SOC}_{\text{den}} \times S$$

式中: $\text{SOC}_{\text{den}}$ ——土壤有机碳密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $\text{SOC}$ ——有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ ); $\gamma$ ——土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $h$ ——土层厚度; $\delta_{2\text{mm}}$ ——土壤颗粒尺寸大于  $2\text{ mm}$  的百分数; $\text{SOC}_{\text{tden}}$ ——土壤碳储量( $\text{kgC}$ ); $S$ ——研究区面积( $\text{m}^2$ )。

1.3.2 数据处理 本文在分析采煤塌陷对大柳塔矿区不同土层深度、不同坡位的土壤碳储量变化的基础上,采用因子分析法辨识影响土壤碳储量的因子,并结合方差分析提取的采煤塌陷前后差异显著的因子进行相关性分析,在此基础上,利用回归分析进一步揭示影响碳储量变化的主导因子,以期采煤塌陷区土壤修复和生态恢复提供理论参考。

## 2 结果与分析

### 2.1 采煤塌陷区土壤碳储量变化特征

2.1.1 不同土层深度土壤碳储量垂直变化特征 在不同土层深度上,采煤塌陷前后土壤碳储量(表 1)表现出以下规律:(1) 对照区和沉陷区均基本呈现从表层向底层递减的趋势, $0—20\text{ cm}$  递减趋势明显, $20—60\text{ cm}$  递减趋势变缓。这与以往的研究结论基本一致<sup>[15]</sup>,只对照区在  $50—60\text{ cm}$  土层出现小幅回升。原因可能是,各不同土壤剖面上覆植被状况、土壤孔隙度、土壤养分含量等性质均会影响到土壤碳储量的垂直分布格局。(2) 土壤碳储量主要集中在土壤表层( $0—20\text{ cm}$ ),占总量的  $45\%$  以上,其余各层基本呈现均衡分布态势。(3) 通过对比分析发现,采煤塌陷后, $0—10\text{ cm}$  土层降低, $10—20\text{ cm}$  土层增加,土壤表层( $0—20\text{ cm}$ )在采煤塌陷前后差异不明显。这表明

该区采煤塌陷对土壤表层碳储量影响不大。原因可能是,虽然地表错动、地裂缝发育等扰动了该区原有的土壤—植被系统生态平衡,但新平衡的形成也在一定程度上弥补了这种损失。(3) 经方差分析发现,采煤塌陷前后土壤碳储量在含量上差异不显著( $p<0.05$ ),但在不同土层深度的空间分布上差异显著。从表 1 可以看出,沉陷区 0—10 cm,10—20 cm,40—

50 cm,50—60 cm 土层变异系数差异较大。原因可能是,采煤塌陷后,地形地貌发生改变,在一定程度上干扰或破坏了原有的土壤—植被系统,进而影响了表土的理化性状和自身的营养条件,进一步威胁到土壤养分和水分的保持,最终引起土壤物质的移动和流向变化,土壤结构发生变化,从而造成采煤塌陷前后土壤碳储量垂向分布差异显著。

表 1 对照区和沉陷区不同土层深度土壤碳储量变异系数

土层 深度/cm	对照区			沉陷区		
	均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数
0—10	3.2868	1.12539	0.34	2.9300	1.22292	0.42
10—20	1.7184	0.67288	0.39	1.9458	1.10259	0.57
20—30	1.3069	0.67507	0.52	1.3283	0.76784	0.58
30—40	1.0967	0.54241	0.49	1.1159	0.55964	0.50
40—50	0.9379	0.39853	0.42	1.1142	0.70233	0.63
50—60	1.0149	0.50872	0.50	0.9699	0.25045	0.26

2.1.2 不同坡位土壤碳储量变化特征 对不同坡位土壤碳储量进行分析发现,对照区和沉陷区的土壤碳储量均表现出坡底>坡中>坡顶的规律(表 2)。采煤塌陷前后,土壤碳储量含量差异不显著,但沉陷区坡底和坡中的土壤碳储量比对照区增加,表明采煤塌陷后,由于地表错位、植被覆盖度降低等原因,迫使土壤碳储量自坡顶向坡底流失,导致坡底土壤碳储量汇集。

量影响差异显著( $p<0.05$ )。原因可能是,沉陷区坡底土壤碳储量变化剧烈,采煤塌陷加剧了坡面土壤侵蚀程度,形成沉陷前后碳储量的显著差异。采煤塌陷后,坡中部位土壤碳储量富集速率比沉陷前高 42.3%,受沉陷垂直错动影响,土壤结构松散,不利于地表植被的生长,土壤养分更易沿着覆岩冒落带和裂缝处向下渗漏,造成沉陷后坡中部位植物中的碳向坡底转移,使得坡底部位土壤碳储量富集速率显著提高。

方差分析发现,采煤塌陷对坡底部位的土壤碳储

表 2 对照区和沉陷区不同坡位土壤碳储量变异系数

坡位	对照区			沉陷区		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
坡底	1.5030	1.01020	0.6721	1.9556	0.72044	0.3684
坡中	1.3043	0.93204	0.7146	1.5658	1.29408	0.8265
坡顶	1.2909	0.83475	0.6466	1.1385	0.95921	0.8425

2.2 土壤碳储量与土壤性质相关性分析

为了辨识采煤塌陷对土壤碳储量影响的主要因子,选择表征物理性质(pH、土壤孔隙度、土壤含水率)、化学性质(全氮、全磷、全钾、有机质、速效氮、速效磷、速效钾)和生物性质(土壤脲酶、蔗糖酶)的 12 项指标,采用因子分析方法提取主成分,进而辨识出主要影响因子,并计算其影响程度。

在累计贡献率达到 80%的前提下,根据主成分载荷矩阵(表 3)分析发现,对照区的土壤碳储量主要与全氮、全磷、有机质、土壤孔隙度、土壤含水率、速效钾、速效氮 7 个指标关系密切;沉陷区的土壤碳储量主要与脲酶、蔗糖酶、土壤孔隙度、土壤含水率、pH、全氮 6 个指标关系密切。同时,就沉陷区和对照区的上述 12 个指标进行方差分析发现,土壤孔隙度、土壤含水率、全氮、全磷、有机质差异显著( $p<0.05$ )。综合上述,选择土壤孔隙度、土壤含水率、全氮、全磷、有

机质进行采煤塌陷对土壤碳储量影响分析。

在提取主成分的基础上,采用相关分析揭示土壤碳储量与土壤性质的关系(表 4)。

(1) 土壤孔隙度。大柳塔矿区主要为风沙土,该类型土壤结构性较差,而采煤塌陷产生的土体错落加剧了该区土壤质地、结构和有机质含量等的破坏过程,使土壤孔隙度明显增大,增强了其水热交换能力、透气能力、保水性能,有利于植被的生长。

由相关性分析结果可知(表 4),土壤有机碳含量与土壤孔隙度呈现显著正相关关系,相关系数达到了 0.943 ( $p<0.01$ )。二者线性拟合分析结果显示  $R^2=0.8897$ (图 1a),说明土壤碳储量随土壤孔隙度的变化而变化。

(2) 土壤含水率。采煤塌陷区的地表塌陷诱发土壤结构变化,如土壤孔隙度、土壤容重、层位的变化等,迫使土壤水分布随之变化。对比采煤塌陷前后土壤含水率变化可知,采煤塌陷造成沉陷区土壤含水率

显著下降( $p<0.05$ )。由图 1b 可知,土壤碳储量与土壤含水率未在 0.05 水平上达到显著负相关,但在 0.1 水平上为显著负相关,且线性分析  $R^2=0.563\ 5$ ,说明二者线性关系较明显。有研究表明,较高的土壤含水率有利于土壤有机碳的分解,使土壤有机碳的积累量减少<sup>[15]</sup>,与本文研究结论一致。

表 3 主成分载荷矩阵

指标	沉陷区					对照区			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
pH	-0.084	-0.261	-0.025	0.877	0.104	-0.527	-0.427	0.072	0.173
土壤孔隙度	.0319	-0.099	0.612	-0.181	0.208	0.074	0.922	0.065	0.096
土壤含水率	-0.177	0.017	0.759	0.210	0.021	-0.079	0.787	0.040	0.450
全氮	-0.078	0.078	0.039	-0.024	0.768	0.863	-0.037	0.194	0.114
速效氮	-0.040	0.858	0.097	-0.300	0.038	0.068	0.142	-0.008	0.804
速效磷	0.413	0.017	0.364	0.133	0.471	0.416	0.356	0.255	-0.244
速效钾	0.783	-0.110	0.234	0.033	-0.305	0.127	-0.155	0.728	0.309
全钾	-0.163	-0.467	-0.274	-0.616	0.219	0.057	-0.160	-0.736	-0.035
全磷	0.174	0.686	-0.321	0.136	0.151	0.012	0.050	0.678	-0.250
有机质	0.612	0.200	-0.464	0.051	0.244	0.843	0.193	-0.040	0.143
土壤脲酶	0.949	0.054	0.028	-0.020	-0.018	0.741	-0.217	-0.088	0.016
蔗糖酶	0.903	0.152	-0.128	-0.052	0.123	0.542	0.251	0.056	0.498

表 4 土壤碳储量与土壤理化性质相关性分析结果

	土壤碳储量	土壤孔隙度	土壤含水量	全磷	全氮	有机质
土壤碳储量	1					
土壤孔隙度	0.943**	1				
土壤含水量	-0.751	-0.698	1			
全氮	0.864**	0.696	-0.759	1		
全磷	0.431	0.237	-0.677	0.714	1	
有机质	0.967**	0.855*	-0.849*	0.941**	0.616	1

注:\*\*表示在 0.01 水平上显著,\*表示在 0.05 水平上显著。

(3) 全氮。经方差分析结果可知,采煤塌陷前后土壤全氮含量差异显著( $p<0.05$ )。采煤塌陷后,沉陷区土壤碳储量与土壤全氮呈现显著正相关,相关系数为 0.864( $p<0.01$ )。分析表明(图 1c),随着土壤中全氮的增加,土壤碳储量随之增加,二者相关系数为 0.746 2。这主要是因为土壤氮素富集可促进土壤碳的积累,土壤全氮主要以有机氮的形式存在于土壤有机质中,揭示出土壤氮素水平对土壤碳固定具有正效应,即全氮含量是导致土壤碳储量增加的诱因之一。土壤碳氮变化存在一定的关联性,这与以往多数研究结论一致。

(4) 全磷。采煤塌陷促使沉陷区的土壤全磷质量分数比对照区增加了 59.8%。这可能是由于土壤中存在较多的迟效性磷酸盐,采煤塌陷使有机磷转化受到影响,导致土壤中全磷不断累积。虽然方差分析结果显示,采煤塌陷前后土壤全磷含量差异显著( $p<0.05$ ),但在沉陷区进行土壤碳储量与土壤全磷线性关系分析可知,二者线性关系并不明显(图 1d)。

(5) 土壤有机质。大柳塔矿区的土壤有机质主要集中在土壤表层(0—10 cm),且未沉陷区土壤有机质

质量分数高于沉陷区。方差分析显示,采煤塌陷前后,土壤有机质含量差异显著( $p<0.05$ )。由表 4 可知,采煤塌陷后,沉陷区土壤碳储量与有机质呈现显著正相关关系(0.967),进一步进行线性分析发现(图 1e),二者  $R^2=0.953\ 3$ ,二者的高度一致性表明采煤塌陷后,有机质含量是影响土壤碳储量分布的重要因素。

### 2.3 土壤碳储量与土壤理化性质的回归分析

为了更加明晰大柳塔矿区采煤塌陷对土壤碳储量的影响,对制约其变化的土壤理化性质(土壤孔隙度、全氮、有机质),应用回归分析方程,辨识影响土壤碳储量的主导影响因子,并计算各因子的影响程度。回归分析方程如下:

$$y=0.435x_1+0.05x_2+0.590x_3+4.133E-16$$

式中: $y$ ——土壤碳储量; $x_1$ ——土壤孔隙度; $x_2$ ——全氮; $x_3$ ——有机质。

分析结果表明, $F$  统计量为 46.369,自由度为 5,系统自动检测的显著性水平为 0.05,回归关系较显著,因此,所建方程能够客观反映出采煤塌陷后土壤碳储量与其影响因子之间的关系。

通过比较回归方程标准化回归系数发现,对大柳

塔矿区采煤塌陷后土壤碳储量影响最大的是土壤有机质,其次是土壤孔隙度。土壤有机质的含量在不同土壤中差异很大,在荒漠土和风沙土中含量低的不足 1% 或 0.5%。采煤塌陷对该区土壤有机质具有一定的破坏作用,该区风沙土结构松散,本身有机质质量分数低,沉陷区土壤孔隙度比对照区在不同土层深度均有不同程度的减少,孔隙度越大,土壤呼吸作用越强,土壤碳的转化越快,土壤碳储量随之增加。

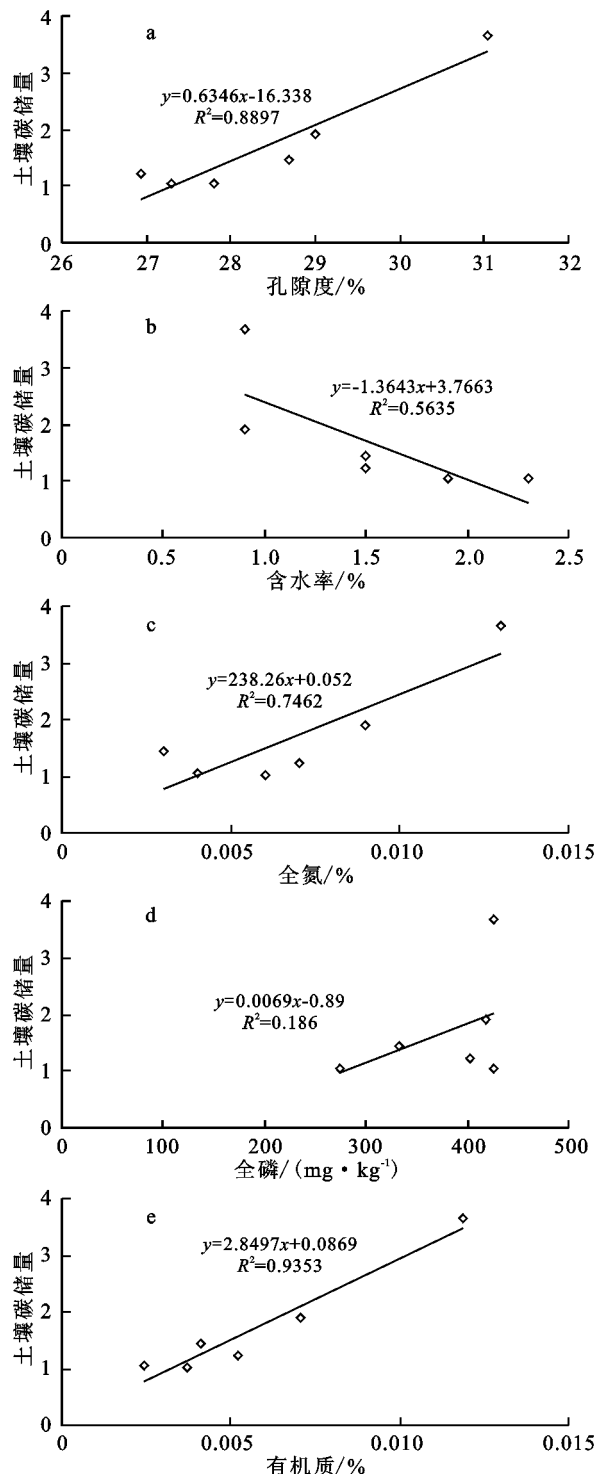


图 1 土壤碳储量与土壤性质相关性分析结果

### 3 结论与讨论

在野外调查采样,实验室数据分析的基础上,采用方差分析揭示了土壤碳储量的空间差异,进而采用因子分析提取影响其变化的主因子,并采用相关分析这一数学计量方法揭示二者之间的关系,客观反映了采煤塌陷对土壤碳储量的影响。

在不同土层深度上,沉陷区和对照区土壤碳储量基本呈现从表层向底层递减的趋势。土壤碳储量在含量上差异不显著( $p < 0.05$ ),但在不同土层深度的空间分布上差异显著。在不同坡位上,对照区和沉陷区的土壤碳储量均表现出坡底 > 坡中 > 坡顶的规律。方差分析发现,采煤塌陷对坡底部位的土壤碳储量影响差异显著( $p < 0.05$ )。这与刘伟红<sup>[15]</sup>、周瑞平<sup>[16]</sup>的研究结论一致。由此可见,采煤塌陷造成塌陷前后土壤碳储量变化方向和速率的不一致性。不同土层深度、不同坡位土壤碳储量会因土壤孔隙度、土壤含水率、土壤养分、植被、海拔等因素的差异而不同。

土壤碳储量与土壤孔隙度、全氮、有机质呈现显著正相关关系,相关系数分别为 0.943, 0.864, 0.967 ( $p < 0.01$ )。这与蔡奎<sup>[17]</sup>、孟庆俊<sup>[18]</sup>等的研究结论一致。由此说明,土壤碳储量与土壤性质关系密切,可以根据其土壤性质特点,因地制宜采取土壤整治措施,从而恢复该区土壤肥力,最终促进生态恢复。

采煤塌陷导致大柳塔矿区土壤碳储量的时空差异,因此,后续研究中需要继续加强时间序列上土壤碳储量变化空间变异特征分析。此外,土壤碳储量的大小受植被、气候、土壤性质、土地利用方式变化等多种自然因素和人文因素的综合影响。已有的采煤塌陷对土壤碳储量影响的研究,尚没有普遍性、确定性结论。这是由土壤自身结构复杂,空间差异大,采样方法、估算方法、研究尺度不一致造成的。今后,进行矿区碳储量研究,应加大地面监测力度,增加调查样本数量,提高基础数据精度,减少碳储量研究中的不确定性,从而为矿区碳循环研究积淀基础数据。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵魁. 煤矿塌陷复垦区土壤呼吸及碳平衡研究[D]. 安徽淮南:安徽理工大学,2013.
- [3] 唐紫哈,李妍均,陈朝,等. 西南山区采煤塌陷地生态服务价值分析:以重庆市松藻矿区为例[J]. 水土保持研究,2014,21(2):172-178.

- 91-94.
- [7] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].林业科学,2003,39(1):168-172.
- [8] 林德喜,樊后保.马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J].林业科学,2005,41(6):7-15.
- [9] Poll C, Marhan S, Ingwersen J, et al. Dynamics of litter carbon turnover and microbial abundance in a rye detritusphere[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 1306-1321.
- [10] 梁红,冯颖竹,王英强,等.广东省顺德古银杏的初步研究[J].中国生态农业学报,2003,11(1):127-129.
- [11] 陈平,梁建华,韩瑞宏,等.顺德裸露石质边坡复绿植物多样性及群落演替分析[J].广东农业科学,2013,17: 155-159.
- [12] 王丹丹,张建军,丁杨,等.晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2014,28(3):14-18.
- [13] 马海霞,王柳英.7种混播组合对公路边坡土壤物理性质改善的比较[J].青海大学学报:自然科学版,2007, 25(2):18-21.
- [14] 曹鹤,薛立,谢腾芳,等.华南地区八种人工林的土壤物理性质[J].生态学杂志,2009,28(4):620-625.
- [15] 丁松,应学亮,吕丹,等.赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响[J].水土保持研究,2014,21(3): 31-36.
- [16] 林波,刘庆,吴彦,等.川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响[J].应用与环境生物学报,2003,9(4):346-351.
- [17] 郭继勋,祝廷成.羊草草原枯枝落叶积累的研究:枯枝落叶积累对草原生态环境及生产力的作用[J].草业科学,1994,11(4):15-16.
- [18] 黄进勇,严力蛟,王兆赛.红壤小流域不同土地利用方式下的水土流失特征[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(1):78-52.
- [19] 赵筱青,和春兰,许新惠.云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J].生态环境学报,2012,21(11):1810-1816.
- [20] 杨曾奖,曾杰,徐大平,等.森林枯枝落叶分解及其影响因素[J].生态环境,2007,16(2):649-654.
- [21] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites[J]. Oecologia, 1997, 111(2):151-159.
- [22] 姜红梅,李明治,王亲,等.祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J].水土保持研究,2011,18(5):166-170.
- [23] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学报,2004,23(6):77-83.

~~~~~

(上接第148页)

- [4] 谢元贵,车家骧,孙文博,等.煤矿矿区不同采煤塌陷年限土壤物理性质对比研究[J].水土保持研究,2012,19(4):26-29.
- [5] 甘兵勇.采煤塌陷对生态环境的影响及对策[J].能源环境保护,2003,17(3):46-47.
- [6] 马祥爱,白中科,邵月红,等.黄土丘陵采煤塌陷地非污染生态影响评价:以阳泉煤业(集团)有限责任公司开元矿为例[J].山西农业大学学报:自然科学版,2004,24(1):47-51.
- [7] 栗丽,王曰鑫,王卫斌.采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J].土壤通报,2010,41(5):1237-1240.
- [8] 臧荫桐,汪季,丁国栋,等.采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J].土壤学报,2010,47(2):262-269.
- [9] 麦霞梅,赵艳玲,龚毕凯,等.东滩煤矿高潜水位采煤塌陷地土壤含水量变化规律研究[J].中国煤炭,2011,37(3):48-51.
- [10] 周莹,贺晓,徐军,等.半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性的影响[J].生态学报,2009,29(8):4517-4525.
- [11] 王蓉,康萨如拉,牛建明,等.草原区露天煤矿复垦恢复过程中植物多样性动态:以伊敏矿区为例[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2013,44(6):597-606.
- [12] 雷少刚,卞正富.西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J].生态学报,2014,34(11):2837-2843.
- [13] 苏敏.采煤塌陷区土壤养分循环及对生态环境的影响研究[D].河北邯郸:河北工程大学,2010.
- [14] 董云中,王永亮,张建杰,等.晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量[J].应用生态学报,2014,25(4):955-960.
- [15] 刘伟红.黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤有机碳的变化特征及影响因素[D].北京:中国地质大学,2014.
- [16] 周瑞平.鄂尔多斯地区采煤塌陷对风沙土壤性质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [17] 蔡奎.河北平原区土壤有机碳储量变化控制因素及趋势分析[D].石家庄:石家庄经济学院,2012.
- [18] 孟庆俊.采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2010.