

# 干旱地区煤层开采对地表土壤理化性质的影响

吴志远<sup>1,2</sup>, 彭苏萍<sup>1</sup>, 杜文凤<sup>1</sup>, 崔凡<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2.北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

**摘要:**为研究干旱地区煤矿开采对地表土壤理化性质的影响,分别在煤矿开采前、中、后对开采区地表土壤含水率、土壤有机质含量、土壤密度及土壤机械组成进行了研究。结果表明:在煤层开采前,开采区地表土壤含水率与土壤孔隙度相关,相关系数为 0.70,但相关性并不显著,地表土壤水分与其他土壤物理性质基本无关。在沉陷盆地形成过程中,开采区地表土壤水分相比开采前减小 1.22%~1.93%,平均减小为 1.52%;土壤孔隙度显著增大,土壤有机质含量略微降低,土壤机械组成基本没有变化。地表土壤含水率与其他土壤理化性质均有不同程度的相关性,但相关性均不显著。在沉陷盆地形成稳定后,沉降盆地中心位置地表土壤含水率逐渐恢复甚至大于未开采前,沉降盆地边缘位置地表土壤含水率一直处于减小状态,沉降稳定后土壤孔隙度相比开采前有所增大,土壤有机质含量基本不变,土壤粉粒含量显著增大,土壤黏粒含量降低,地表土壤水分含量与土壤孔隙度呈正相关关系。

**关键词:**煤矿开采; 土壤理化性质; 沉陷盆地; 土壤机械成分

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0075-06

## Effect of Coal Mining on Surface Soil Physicochemical Properties of Sandy Land in the Arid Region

WU Zhiyuan<sup>1,2</sup>, PENG Suping<sup>1</sup>, DU Wenfeng<sup>1</sup>, CUI Fan<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe mining, China University of mining and Technology, Beijing, 100083, China; 2.Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to study the influence of coal mining on the physical and chemical properties of surface soil in arid areas, the soil moisture content, soil organic matter content, soil density and soil mechanical composition of the mining area before, during and after coal mining were investigated. The results show that before the coal mining, the surface soil moisture content in the mining area is related to soil porosity, the correlation coefficient is 0.70, but the correlation is not significant, the surface soil moisture is basically independent of other soil physical properties; in the formation process of subsidence basin, the surface soil moisture in the mining area decreased by 1.22%~1.93% compared with that before mining, and the average reduction was 1.52%; the soil porosity increased significantly, the soil organic matter content decreased slightly, and the soil mechanical composition was basically no change. The soil moisture content of the surface has correlation with other soil physical and chemical properties to some extent, but the correlation is not significant. After the subsidence basin is stabilized, the surface soil moisture content in the central part of the subsidence basin gradually recovers and is even greater than that before coal mining. The surface soil moisture content at the edge of the subsidence basin has been decreasing. After the settlement is stabilized, the soil porosity increased compared with that before coal mining. The soil organic matter content is basically unchanged, the soil silt content significantly increases, the soil clay content decreases, and the surface soil moisture content is positively correlated with soil porosity.

**Keywords:** coal mining; physical and chemical properties of soil; subsidence basin; soil mechanical composition

土壤水分是影响地表植被生长及土壤理化性质的主要因素之一,在干旱半干旱地区,地表土壤水分是控制土壤沙漠化的关键因素<sup>[1-3]</sup>。

地下煤层开采导致地表沉陷、裂缝滋生,增加了地表水分的蒸发及入渗情况,改变土壤水分的运移规律。同时由于沉陷盆地的形成,导致开采区地表土壤水分分布产生变化。在开采沉陷、雨水及风力等因素的综合作用下,地表土壤发生破坏推移、沉积等土壤侵蚀现象,进而影响到土壤的其他物理性质如土壤粒度、有机质含量等,而这些土壤理化性质对土壤水分的赋存和运移具有重大的影响<sup>[4-6]</sup>。

在中国西部煤矿开采区,由于气候干旱,降雨稀少,自然环境条件恶劣,导致植被覆盖率较低,生态环境不断恶化<sup>[7-8]</sup>。因此研究煤矿开采区土壤的运移及变化规律是煤矿开采区地表土壤整治及生态环境恢复的基础及关键环节。

本文主要从地下煤层开采前、中、后3个时间段分析地表土壤水分的运移及变化情况,同时分析与土壤水分联系紧密的土壤密度、土壤有机质含量及土壤机械组成等土壤参数,得到煤矿开采对地表土壤水分分布及运移的影响规律。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县大柳塔镇西北部,地理坐标为 $39^{\circ}16'27.5''$ — $39^{\circ}17'13.3''$ N,  $110^{\circ}20'32.27''$ — $110^{\circ}20'53.24''$ E。研究区主要属风沙堆积地貌,上部由砂层覆盖,砂层厚度0.5~20 m不等,下部为黏土。区内高程最大变化值为35.2 m,地势中间高两边低,植被主要为沙柳和苔藓,由于前几年煤矿公司的绿化,研究区内分布着少量的杨树。年平均降雨量为350 mm,而年平均蒸发量为2 297.4~2 838.7 mm,研究区内属亚热带季风气候,常年风沙较大<sup>[9-10]</sup>。由于干旱的气候以及较少的地表径流,导致该地区地下水位较深。该地区降雨量集中在6月、7月、8月份,该时间段降雨量占全年降雨量的70%左右,见图1。

## 2 试验设计

本次研究选择以矿区2305工作面为主要研究对象,同时选取未开采区2306工作面作为参考。三次取样时间分别为2013年8月、12月及2014年5月,分别为2305工作面地下煤层开采前、开采中和塌陷形成稳定后阶段。沿着工作面开采方向共设置5条测线,分别命名为 $L_1, L_2, L_3, L_4$ 及 $L_5$ ,每条测线间隔为100 m。2306工作面内同样布置测线5条,分别命

名为 $L_6, L_7, L_8, L_9$ 和 $L_{10}$ 如图2所示。每条测线每隔25 m取一次样,取样深度为0.2 m。

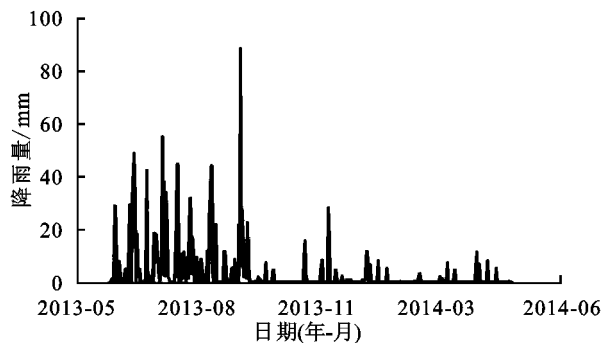


图1 月平均降雨量

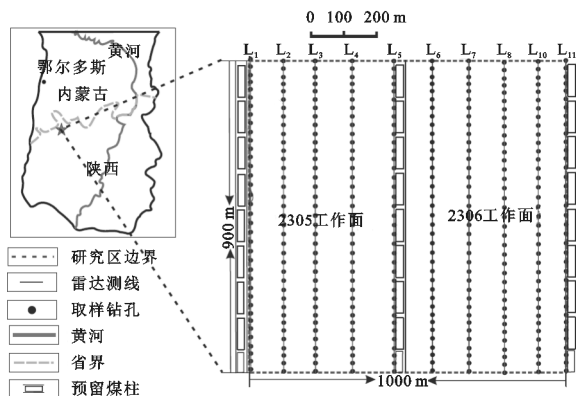


图2 研究区位置

## 3 研究方法

(1) 土壤含水量测定。利用钻孔工具如土钻、洛阳铲及环刀等对土壤进行取芯,将土样置于 $105^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘12个小时左右,直至恒重并计算土壤含水率,土壤含水率计算公式如下:

$$\text{GWC} = (W_1 - W_2) / (W_2 - H) \quad (1)$$

式中:GWC为重量含水率; $W_1$ 为湿土加盒重; $W_2$ 为干土加盒重; $H$ 为盒重。

(2) 地表高程测量。使用RTK对每一个取样点高程进行探测,共探测3次,探测精度为cm级。

(3) 土壤机械成分分析。土壤机械成分分为砂粒( $0.02 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ )、粉粒( $0.02 \leq d < 0.002 \text{ mm}$ )和黏粒( $d \leq 0.002 \text{ mm}$ )3种类型。

(4) 土壤有机质测定。土壤有机质使用重铬酸钾容量法(外加热法)计算得出。

(5) 土壤孔隙度由土壤容重与土壤比重的比值得出。其中土壤容重由环刀法计算得出,运用比重瓶方法计算得出土壤比重,运用了土壤容重和比重的结果计算了土壤孔隙度。

## 4 结果与分析

### 4.1 地表沉陷对高程的影响

使用RTK对研究区高程变化进行了探测,第1, 2, 3次探测地表平均海拔分别为1 215.8 m, 1 214.4

m 和 1 213.8 m,由于地下煤层属于一次性采全高,致使地表产生整体沉降,地表下降较均匀,见图 3。

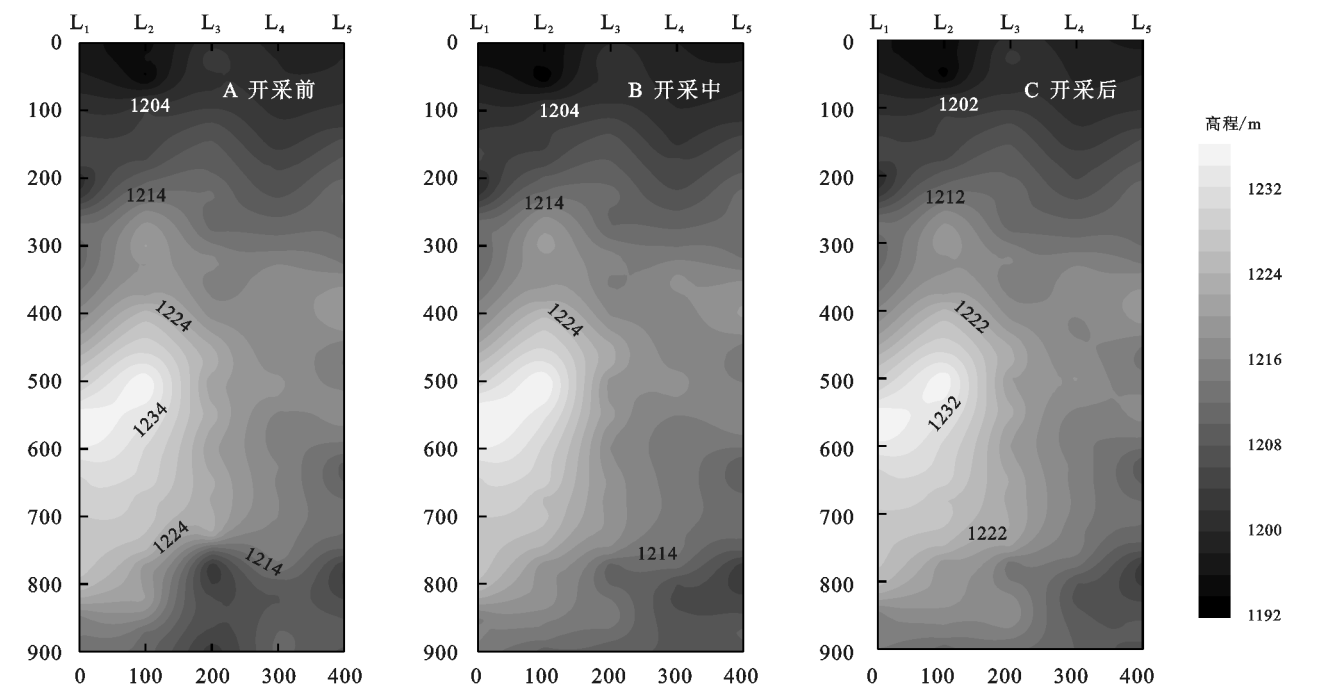


图 3 2305 工作面煤层开采前、中、后高程变化

4.2 地表沉陷对土壤水分含量的影响

表 1 为 3 次探测开采区与未开采区土壤水分分布情况 Parson 分析。对于开采区,在煤层开采中的 12 月份,由于煤层开采产生落差较大的阶梯型裂缝(落差最大为 42 cm),同时产生较多的“X”型交叉裂缝,L<sub>1</sub> 至 L<sub>5</sub> 测线土壤水分相比未开采前土壤水分降低较多,两次探测土壤含水率降低范围分布在 1.22%~1.93%,平均减小为 1.52%。而在沉降稳定后的 2014 年 5 月,开始进入降雨季节,L<sub>2</sub>,L<sub>3</sub>,L<sub>4</sub> 地表土壤水分逐渐恢复,又由于位于沉降中心位置,有利于降雨集中,L<sub>3</sub> 测线含水率甚至比开采前要大。而靠近开采区边界位置的 L<sub>1</sub>,L<sub>5</sub> 测线土壤水分略有恢复,但依然较小,这是由于阶梯型裂缝属于永久性不能闭合裂缝,同时“X”型交叉裂缝表层被充填较快,地下存在隐伏裂缝,在降雨量充足的条件下依然起到导水作用。开采区内 3 次探测土壤含水率变化较大,其中开采前与开采中含水率变化均较大,表明地下煤层开采对地表土壤水分变化的影响要大于季节变化地表土壤水分变化的影响。

为了排除季节对土壤水分的影响,对比分析了未开采区(2306 工作面)土壤水分的变化情况,测线布置与取样方法与 2305 相同,可以发现三次探测未开采区土壤含水率呈现出“大一小一大”的基本变化规律,其中 12 月份土壤含水率最小,这与 12 月份降雨量低有一定关系,同时 2016 年 5 月份土壤含水率小于 2015 年 8 月份,但含水率变化均<1%,表明在未开采区季节变化对土壤含水率变化影响较小。

表 1 3 次探测 2305,2306 工作面内各测线平均含水率表

研究区	测线	2013.08	2013.12	2014.05
2305 工作面	L <sub>1</sub>	6.58±0.07cdA	4.65±0.32cB	5.19±0.55bC
	L <sub>2</sub>	6.86±0.08bA	5.32±0.30bB	6.23±0.30bA
	L <sub>3</sub>	6.24±0.22eA	5.02±0.16bcB	6.60±0.34bA
	L <sub>4</sub>	7.02±0.17bA	5.35±0.09bB	6.74±0.06abA
	L <sub>5</sub>	6.36±0.10deA	5.12±0.13cB	5.34±0.28cB
	L <sub>6</sub>	6.82±0.13bcA	6.45±0.09aB	6.32±0.13bB
2306 工作面	L <sub>7</sub>	6.21±0.14eB	6.11±0.19aB	7.21±0.44aA
	L <sub>8</sub>	6.23±0.11eA	6.49±0.28aA	6.18±0.30bA
	L <sub>9</sub>	7.48±0.09aA	6.14±0.44aB	6.23±0.24bB
	L <sub>10</sub>	6.82±0.22bcA	6.36±0.17aA	6.58±0.39bA

注:所有值以平均含水率±标准误差值表示,不同小写字母表示同一时间下不同处理间的差异显著( $p<0.05$ );不同大写字母表示同一处理下不同时间的差异显著( $p<0.05$ )。

4.3 地表沉陷对土壤水分分布的影响

图 4 为开采区三次探测地表土壤含水率分布图,从图中可以看出,开采前土壤水分分布较均匀,土壤含水率较高,其中含水率较低地区砂层较厚,主要为裸砂地,含水率较大地区砂层较薄,有植被覆盖;在开采过程中,地表土壤水分较低,其中含水率最低区域主要位于开采区边界,这主要是由于开采产生大量阶梯型裂缝所致;在开采沉降稳定后的第三次探测,开采区边界位置土壤含水率逐渐降低,但是开采区中间位置土壤含水率逐渐恢复到开采前情况,甚至大于开采前土壤含水率,但是沉降稳定后土壤含水率分布与开采前相比变化较大,表明地下煤层开采对地表土壤水分变化产生了巨大的影响。

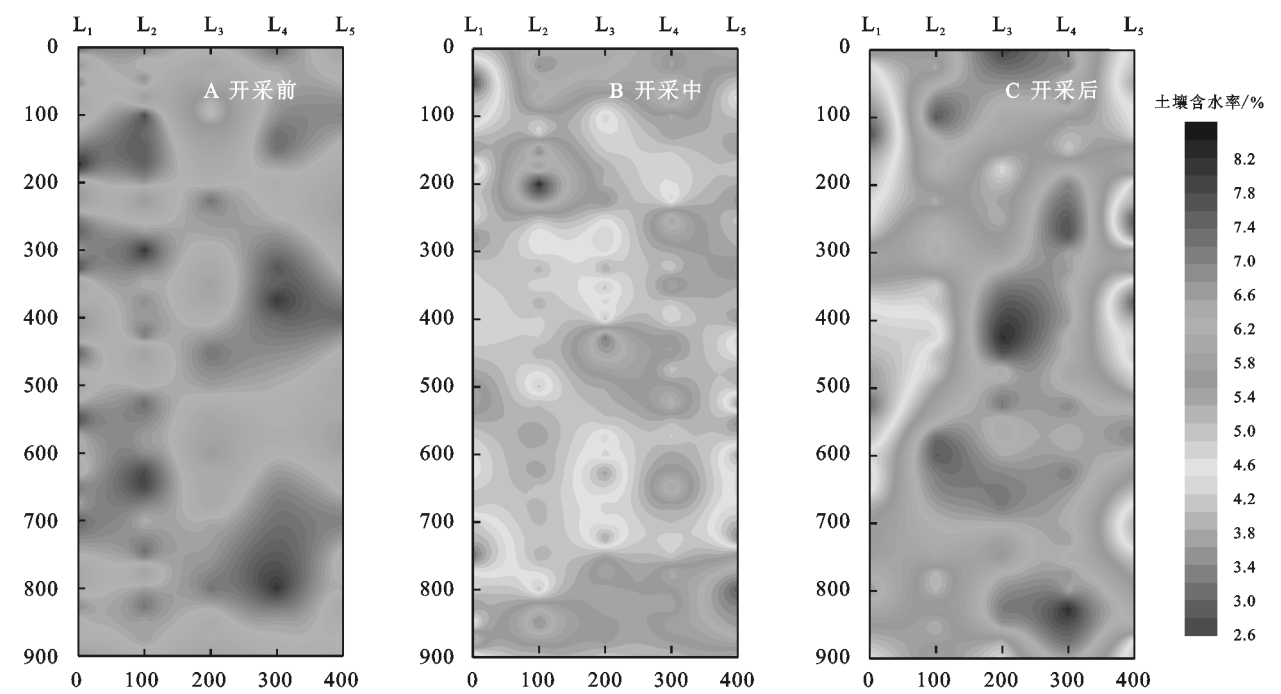


图 4 52305 工作面煤层开采前、中、后地表水分分布

4.4 地表沉陷对土壤孔隙度的影响

图 5 为 3 次取样 2305 工作面 5 条测线内地表土壤孔隙度值,从图中可以看出,开采区 2013 年 12 月第 2 次探测土壤孔隙度值最大,为 47.44%,这与此时地表沉降最剧烈有关。在 2014 年 5 月第 3 次探测时,沉陷盆地变化基本稳定,随着应力分布重新稳定,地表裂缝逐渐闭合,土壤孔隙度有所减小,但与 2013 年 8 月未开采前相比,开采后各测线土壤孔隙度均有不同程度的增大,其中沉降盆地边界位置的 L<sub>1</sub>,L<sub>5</sub> 测线孔隙度增大较明显,平均分别增大为 4.46%,3.98%。沉降盆地中心位置的 L<sub>2</sub>,L<sub>3</sub>,L<sub>4</sub> 测线地表孔隙度增大较小,平均分别增大为 1.52%,2.13%和 2.21%。

4.5 地表沉陷对土壤机械组成的影响

分析采煤前、中、后 3 个阶段 2305 工作面地表土壤机械成分变化情况分布(图 6)可以看出,粗粒砂含量 3 次探测没有明显变化,3 次探测粗粒砂含量平均值分别为 78.40%,78.67%和 78.51%,且沿测线变化规律相同;粉砂含量 3 次探测变化也基本相同,3 次探测粗粒砂含量平均值分别为 18.30%,18.80%和 20.46%,第 3 次探测粉砂含量明显增大,但粉砂含量整体沿侧线变化规律不变。黏粒含量 3 次探测呈依次减小趋势,平均分别为 3.3%,2.53%和 1.03%,实验室分析各测线土壤机械组成变化情况可以得到相同的结论,见表 2。从以上分析中可以看出,地表沉陷致使土壤粉砂含量增大,土壤黏粒减小,这与前人的研究结果相同,表明地表沉陷加剧了土壤沙漠化的进程。

4.6 地表沉陷对土壤有机质含量的影响

从开采区 3 次探测土壤有机质含量变化表可以看出(表 3),除第 3 次探测土壤有机质有所减小外,其他两次探测土壤有机质基本不变,煤矿开采对地表土壤有机质的影响有限,土壤有机质整体变化不大。

表 2 3 次探测 2 305 工作面内各测线平均土壤机械成分

研究区		粗粒(粒径>0.2 mm)		
		2013 年 8 月	2013 年 12 月	2014 年 5 月
2305 工作面	L <sub>1</sub>	78.4±7.17	78.67±6.79	78.51±6.79
	L <sub>2</sub>	75.6±2.0	76.2±1.85	76.4±2.65
	L <sub>3</sub>	81.3±1.65	80.12±2.31	81.4±1.57
	L <sub>4</sub>	73.6±1.65	74.3±1.79	74.9±2.01
	L <sub>5</sub>	72.65±1.91	73.56±2.03	74.12±1.76
研究区		粉粒(0.2 mm≥粒径>0.02 mm)		
		2013 年 8 月	2013 年 12 月	2014 年 5 月
2305 工作面	L <sub>1</sub>	18.3±6.76	18.80±6.50	20.46±6.75
	L <sub>2</sub>	21.36±1.0	21.00±0.87	22.78±1.03
	L <sub>3</sub>	15.23±0.75	17.23±0.96	17.93±0.85
	L <sub>4</sub>	22.30±0.86	23.6±0.92	24.10±0.76
	L <sub>5</sub>	23.68±1.02	23.47±0.96	24.56±1.12
研究区		黏粒(粒径≤0.02 mm)		
		2013 年 8 月	2013 年 12 月	2014 年 5 月
2305 工作面	L <sub>1</sub>	3.29±2.43	2.53±2.15	1.04±0.56
	L <sub>2</sub>	3.04±0.31	2.8±0.36	0.82±0.12
	L <sub>3</sub>	3.47±0.65	2.65±0.41	0.67±0.13
	L <sub>4</sub>	4.1±0.25	2.1±0.11	1.00±0.14
	L <sub>5</sub>	3.67±0.26	2.97±0.18	1.32±0.10

注:所有值以平均含水率±标准误差值表示。



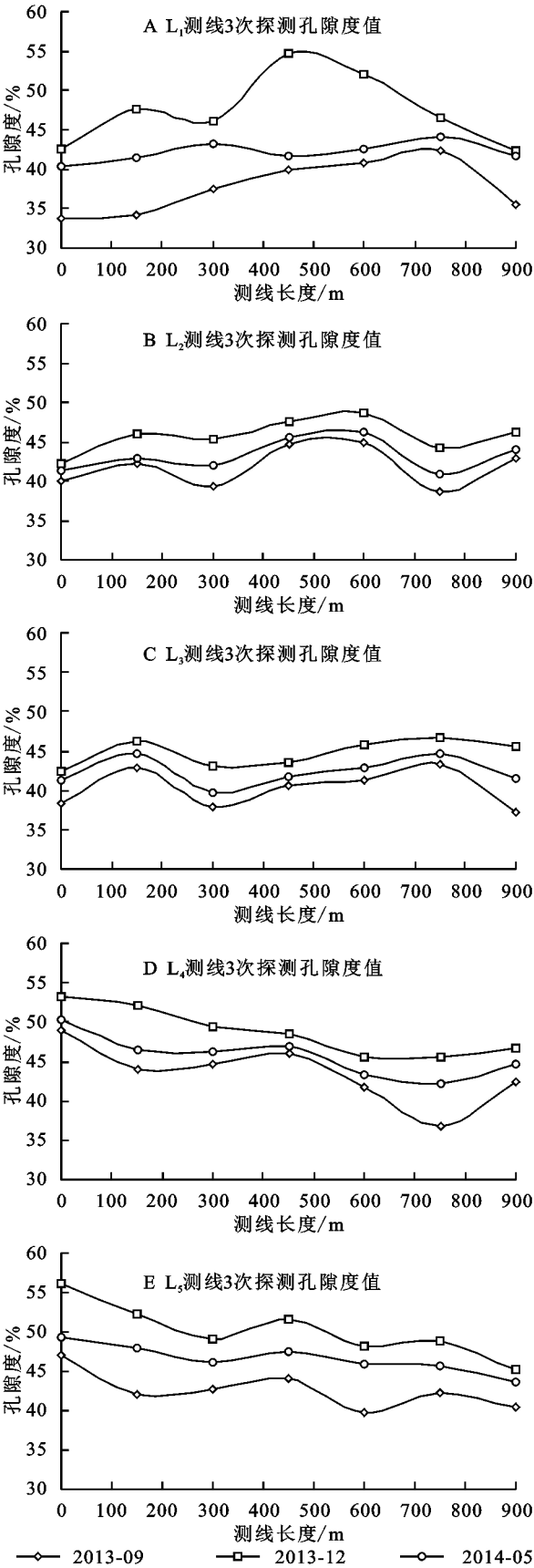


图 5 2305 工作面 3 次探测各测线土壤平均孔隙度随测线分布

4.7 相关性分析

各土壤物理性质与土壤水分的相关性分析如表

4 所示,从表中可以看出第 1 次探测时地表土壤水分与土壤孔隙度具有较高的相关性,但相关性并不显著,地表土壤水分与其他土壤物理性子相关性较低。在沉降活跃阶段的第 2 次探测,土壤水分与土壤孔隙度、粗砂含量、粉砂含量、黏粒含量及有机质含量均有不同程度的相关性,但相关性均不显著,这表明地表沉陷加大了多重因素影响对地表土壤水分变化的影响。第 3 次探测时,沉陷盆地已完全形成并稳定,此时地表土壤水分含量与孔隙度呈明显相关性,且显著相关,地表土壤水分与地表土壤黏粒含量呈负相关关系,但相关性不显著。

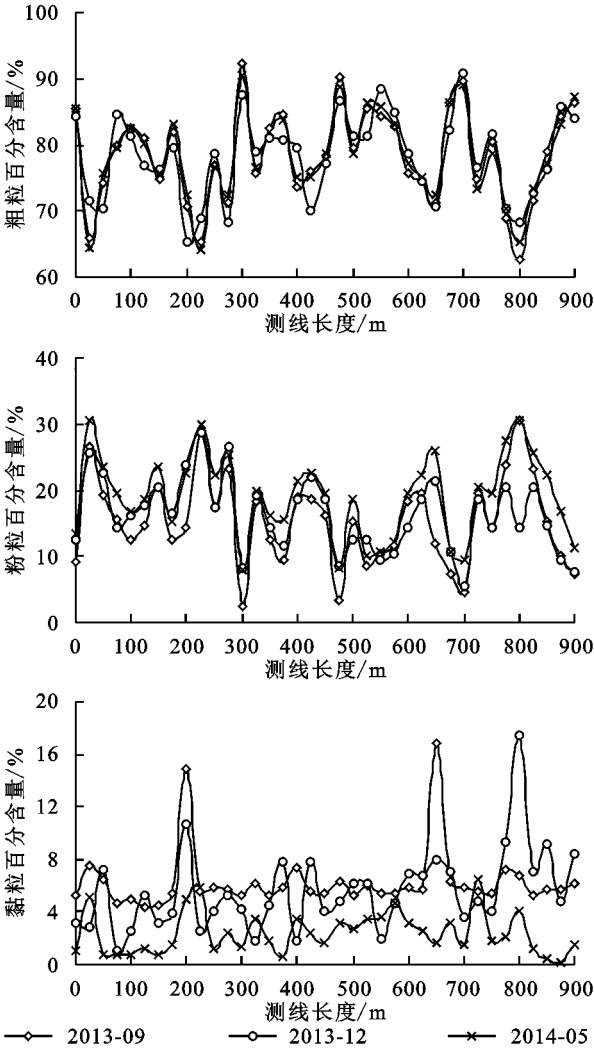


图 6 L<sub>1</sub> 测线 3 次探测土壤机械成分

表 3 3 次探测 2305 工作面内各测线土壤有机质成分

研究区		2013 年 8 月	2013 年 12 月	2014 年 5 月
2305 工作面	L <sub>1</sub>	1.35±0.21	1.42±0.32	1.36±0.25
	L <sub>2</sub>	1.42±0.31	1.36±0.25	1.43±0.13
	L <sub>3</sub>	1.64±0.26	1.58±0.31	1.36±0.27
	L <sub>4</sub>	1.57±0.18	1.62±0.24	1.46±0.21
	L <sub>5</sub>	1.67±0.24	1.54±0.18	1.62±0.17

表 4 相关性分析						
类别	孔隙度	粗砂	粉砂	黏粒	有机质	高程
含水率(第 1 次探测)	0.70	-0.49	0.49	0.19	-0.45	0.25
含水率(第 2 次探测)	0.62	-0.59	0.66	-0.65	0.52	-0.49
含水率(第 3 次探测)	0.88 *	0.19	-0.14	-0.68	-0.30	-0.02

注：\* 为在 0.05 的水平上相关性显著。

## 5 结论

(1) 地表沉陷提高了沉降中心位置地表土层土壤水分含量,但是沉降盆地边缘位置由于存在较多永久不能闭合的阶梯型裂缝,致使土壤水分降低,地表沉降改变了土壤水分原始的分布状态。

(2) 地表沉陷增加了地表土壤粉粒的含量,降低了土壤黏粒的含量,同时提高了开采区地表土壤孔隙度,对土壤粗粒及有机质含量影响不大。

(3) 经过相关性分析发现,地表沉陷提高了地表土壤水分含量与土壤孔隙度的正相关关系。

### 参考文献:

[1] 毕银丽,邹慧,彭超,等.采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J].煤炭学报,2014,39(2):490-495.

[2] 邹慧,毕银丽,朱郴韦,等.采煤沉陷对沙地土壤水分分布的影响[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):496-500.

[3] 吴艳茹.半干旱地区采煤塌陷对土壤性质影响进展研究[J].内蒙古师范大学学报:哲学社会科学版,2011,40(5):109-112.

[4] 王健.半干旱区采煤塌陷对砂质土壤理化性质影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.

[5] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院,2006,75-77.

[6] 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):262-268.

[7] 王健,高永,魏江生,等.采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J].水土保持学报,2006,20(5):52-55.

[8] 王琦,全占军,韩煜,等.采煤塌陷对风沙区土壤性质的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(6):111-118.

[9] 刘哲荣,燕玲,贺晓,等.采煤沉陷干扰下土壤理化性质的演变:以大柳塔矿采区为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):133-138.

[10] 韩煜,史娜娜,王琦,等.采煤塌陷干扰下风沙区土壤理化性质变化特征[J].环境科学与技术,2016,39(11):15-19.

(上接第 74 页)

[13] 程金花,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析[J].水土保持学报,2006,20(5):28-33.

[14] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.

[15] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.

[16] 程立平,刘文兆.黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J].应用生态学报,2012,23(3):651-658.

[17] 陈国靖,蔡进军,马璠,等.宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):49-53,60.

[18] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. Water Resources Research, 1994,30(7):1945-1954.

[19] Schaik N L M B V. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009,78(1):36-47.

[20] 彭进业,俞卞章,李楠,等.分形维数在灰度图像二值化中的应用[J].小型微型计算机系统,2001,22(8):961-963.

[21] 肯尼思·法尔科内.分形几何:数学基础及其应用[M].沈阳:东北大学出版社,1999.

[22] 杨洋,王卫星.基于差分计盒法和数学形态学的路面裂缝分割和提取方法[J].科学技术与工程,2013,13(23):6746-6750.

[23] 张东旭,张洪江,程金花.基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J].农业机械学报,2017,48(12):214-220,277.

[24] 敖礼林.花生地深翻改土的作用与操作要点[J].科学种养,2017(11):32-32.

[25] Zhang Z B. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. Soil & Tillage Research, 2015,146:53-65.

[26] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征[J].水土保持学报,2017,31(3):123-128.

[27] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108.

[28] 潘网生,许玉凤,卢玉东,等.基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J].农业工程学报,2017,33(3):140-147.

[29] 沃飞,陈效民,方堃,等.太湖地区水稻土大孔隙的 CT 扫描分析与灰色关联评价[J].土壤,2008,40(2):319-326.