



移动扫码阅读

琚成远,浮耀坤,陈超,等.神南矿区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(4):309-316.

JU Chengyuan, FU Yaokun, CHEN Chao, et al. Influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content in Shennan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 309-316.

## 神南矿区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量的影响

琚成远<sup>1</sup>,浮耀坤<sup>1</sup>,陈超<sup>2</sup>,冯泽伟<sup>3</sup>,白铭波<sup>3</sup>,胡振琪<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2.河南工程学院 土木工程学院,河南 郑州 451191;

3.陕西陕煤陕北矿业有限公司 韩家湾煤炭有限公司,陕西 榆林 719300)

**摘要:**为探究西部风沙区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量(0~20 cm)的影响,以神南柠条塔煤矿某工作面为研究区,使用时域反射仪(TDR)对动态裂缝以及不同宽度的地裂缝进行了土壤的水分含量监测,结果表明:①在动态裂缝整个发育周期内,裂缝周边表层含水量呈现处一个先快速下降后缓慢上升的趋势,且相对出塌陷侧的含水量损失量小于相对出露侧;且裂缝相对塌陷侧含水量及含水量恢复速度稍大于相对露出侧;在裂缝相对出露侧的土壤含水量受影响范围在85 cm内,影响周期为13 d;在裂缝相对塌陷侧的土壤含水量受影响范围在55 cm内,影响周期为12 d;在土壤自修复的作用下,土壤的含水量都可以得到基本的恢复;②对超充分采动区内不同裂缝宽度条件下(2、5、9、13、17、24、32、35、38 mm)的土壤含水量进行对比分析,发现在宽2、5 mm的裂缝对土壤含水量无显著影响,9 mm及以上的裂缝中,当裂缝宽度相同时,距离裂缝位置越远,土壤含水量越高;在距离裂缝相等时,裂缝宽度越大,土壤含水量越低。

**关键词:**神南矿区;半干旱风沙区;动态裂缝;土壤含水量;裂缝宽度

**中图分类号:**TD327      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2022)04-0309-08

## Influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content in Shennan Mining Area

JU Chengyuan<sup>1</sup>, FU Yaokun<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>2</sup>, FENG Zewei<sup>3</sup>, BAI Mingbo<sup>3</sup>, HU Zhenqi<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 10083, China;

2. School of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

3. Hanjiawan Coal Co., Ltd., Shaanxi Shaanxi Coal Mining North Shaanxi Mining Co., Ltd. Yulin 719300, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content (0~20cm) in the western sandy area, a working face in Shennan Ningtiaota coal mine was taken as the study area, and the dynamic cracks and ground fissures of different widths were investigated by TDR. The results show that: ① During the entire development period of dynamic fractures, the surface water content around the fracture decreases rapidly at first and then increases slowly, and the loss of water content on the lower side is less than that on the upper side, and the water content and water content recovery rate on the lower side of the crack are slightly higher than those on the upper side. The soil water content on the upper side of the crack is affected within 85 cm with a period of 13 days, and the soil water content on the lower side of the crack is affected within 55 cm with a period of 12 d, and the soil water content on the lower side of the crack is slightly faster than that on the upper side of the crack, under the action of soil self-repair, the soil water content can be basically restored; ② under the conditions of different widths (2,5,9,13,17,24,32,35,38 mm) soil water content was compared and analyzed, and it was found that 2 and 5 mm wide cracks had no significant effect on soil water content. In cracks of 9 mm and above, when the crack

收稿日期:2021-10-02      责任编辑:黄小雨      DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-0555

基金项目:国家自然科学基金委煤炭联合基金重点资助项目(U1361203);陕煤集团重大资助项目(2018SHKJ-A-03);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目(202102310333)

作者简介:琚成远(1996—),男,河南新乡人,硕士研究生。E-mail:JCYKustie@outlook.com

通讯作者:胡振琪(1963—),男,安徽五河人,教授。E-mail:huzq1963@163.com

width is the same, the farther away from the crack location, the higher the soil water content; when the distance from the crack is equal, the larger the crack width, the lower the soil water content.

**Key words:** Shennan Mining Area; semi-arid sandy area; dynamic fractures; soil water content; crack width

## 0 引言

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国。煤炭在中国的能源结构中发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>，其储量丰富，开采规模巨大，而且95%以上的煤炭依靠井工开采的方式<sup>[2-3]</sup>。随着煤炭开采战略的西移，位于晋陕蒙交界的榆神府煤田成为主要的煤炭生产基地，其中陕北神南矿区储量就高达57亿t<sup>[4]</sup>，该矿区位于半干旱地区，地表和近地水资源非常宝贵<sup>[5]</sup>。由于地下高强度的煤炭开采使得西北地区气候干旱、水资源短缺的西北地区的生态环境问题雪上加霜<sup>[6]</sup>，采煤引起地表沉降，在地表产生大量规模不等的裂缝、塌陷坑等塌陷地貌，这直接影响到土壤的各项理化性质、地形地貌、水文气象等<sup>[7-11]</sup>，尤其是对土壤水分的影响异常严重，而土壤水分又是制约西北干旱半干旱荒漠地区植被生长和生态环境恢复的关键性因子<sup>[12-16]</sup>。为实现矿区的绿色可持续发展，采煤塌陷区的生态环境重建工作势在必行。因此研究采煤形成的地裂缝对地表含水量的影响有重要意义。目前国内学者在此方面的研究取得了一定成果，吴丽<sup>[17]</sup>研究了塌陷裂缝不同深度的土壤容重变化特征，分析了塌陷裂缝尺度、距裂缝距离和土壤含水率的关系；赵红梅等<sup>[18]</sup>通过对比采煤塌陷区和非塌陷区土壤理化性质，得出采煤塌陷导致矿区土壤粒度和容重变大、持水能力显著降低、土壤水在垂向上的变异性增强等，而对土壤水随季节性动态变化影响不大；何金军等<sup>[19]</sup>学者对大柳塔煤矿塌陷区土壤进行研究，结果表明不同坡位土壤含水量表现为坡底>坡中>坡顶；塌陷增大了土壤毛管孔隙度、砂粒含量，减小了非毛管孔隙度和总孔隙度；塌陷对土壤物理性质影响顺序为：土壤含水量>物理性砂粒含量>土壤密度和孔隙度；魏江生等<sup>[20]</sup>利用中子仪对大柳塔矿区不同年份沉陷区及未采区不同坡位、层次土壤水分动态进行了对比研究；毕银丽等<sup>[21]</sup>为探讨采煤沉陷对土壤水资源的影响，针对井工矿采煤产生的沉陷裂缝，研究了采煤裂缝区土壤水分分布特征，并对采煤裂缝宽度、裂缝密度和土壤含水量的关系进行了探讨。但之前许多土壤水分的研究，采用的是静态的某个时点监测裂缝周围对土壤水分的影响的研究，未考虑整个裂缝发育周期对地表含水量的影响，且研究周期多以年为计量单位。

针对动态裂缝整个发育周期对周边土壤水分的影响研究较少，因此本研究以日为单位、精确测量裂缝出露侧和塌陷侧的土壤水分的含量，来确定动态裂缝对周边土壤水分的影响，为矿区土壤及地表水的修复提供理论基础，丰富地表土壤水分运移理论研究，为风沙区采煤塌陷地的生态修复与植被建设提供有益的理论依据。

## 1 神南矿区土壤含水量测定试验设计

### 1.1 研究区概况

研究区域位于中国陕西省北部神南矿区柠条塔煤矿。它位于陕西省北部，地理坐标为109.67°E~110.9°E, 38.22°N~39.45°N，如图1a所示。本区地处我国西部内陆，为典型的中温带半干旱大陆性气候。气候特点为冬季寒冷，春季多风，夏季炎热，秋季凉爽，四季冷热多变，昼夜温差悬殊，干旱少雨，蒸发量大，降雨多集中在7、8、9三个月，无霜期约为199 d，10月初上冻，次年4月解冻。1月最冷，极端低温-29.7 °C，7月最热，极端气温38.6 °C，近年平均气温8.8 °C，年平均降水量394.6 mm，年平均蒸发量973.8 mm，最大冻土深度1 460 mm，平均风速1.76 m/s。研究区位于柠条塔S12013工作面，该工作面的采煤工艺是采用的是一种全新的无巷道无煤柱自留巷的长臂开采N00工法<sup>[22]</sup>，工作面倾向长度1 760 m，开切眼长度345 m，倾角0.68°~1.88°，但在回风巷中段及里段局部倾角可达4°~5°，煤层厚度为3.7~4.3 m，煤层平均厚度为4.01 m，煤层埋藏深度168~213 m，采用长臂无巷道、无煤柱开采方式。工作面上覆基岩厚度90~130 m，土层厚度40~100 m，沙层厚度2~5 m，为风积沙。

**地形地貌：**研究区属风积沙地，地势平缓，风沙土结构疏松，肥力低，保水性差，表层一般无隔水层，土壤水分的循环主要为降水入渗和上行蒸散过程。

**主要植被类型：**研究区植被种类结构单一，主要植被有沙柳、油蒿、柠条、沙棘等耐干旱草本植物，仅考考乌素沟附近零星出现高大乔木。

预计最大下沉值为2 400 mm，地下水位平均为37.6 m，故地表深度20 cm内土壤含水量不受浅层地下水的影响。监测时，工作面每天推进速度约为10 m，周围工作面均已停采或还未开采，所以不存在其他工作面开采对其造成的干扰。

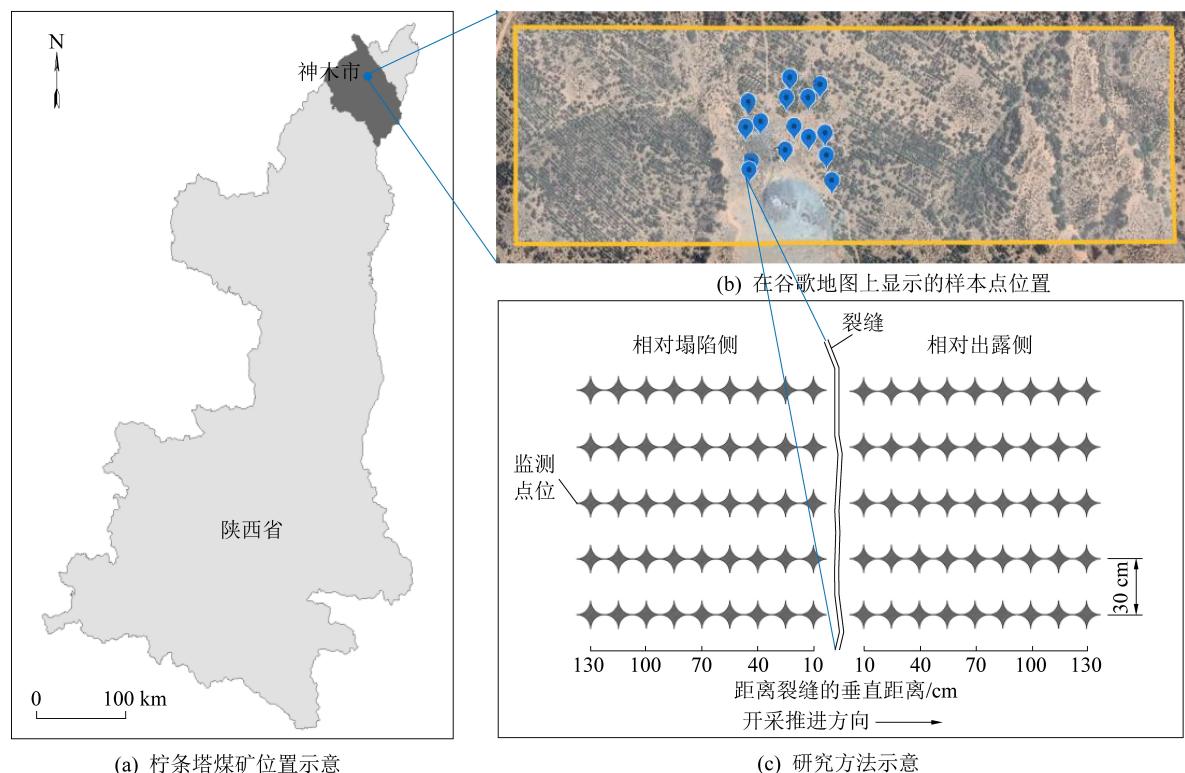


图1 研究区位置及方法  
Fig.1 Location of the study area

## 1.2 试验设计与监测方法

### 1.2.1 采用干烧法对 TDR 测量值进行标定

时域反射法被证明是一种快速和精确测量土壤体积含水量 (VWC) 的技术,因此选用了时域反射仪 (TDR) 为监测地表水分的仪器,探针长度为 20 cm,且监测过程贯穿整个裂缝发育周期。使用 TDR 测量土壤含水量时,为了使测得的土壤含水量更加精确,采用干烧法为基准对 TDR 测定值进行标定,具体步骤如下:在试验区内随机选择 17 处未扰动的点,用 TDR 测量这 17 处土壤 20 cm 深处的土壤含水量,并记录数据;在这 17 处土壤表层,刮去上部覆土,在 20 cm 深处的进行环刀取样,每处取样 3 份,土壤取出后,剔除有机残体,放入已知质量的铝盒中;用酒精灯开始灼烧土壤,并用玻璃棒搅拌,加速其快速蒸发,每组重复实验 3 次,取平均值。

### 1.2.2 动态裂缝对土壤表层含水量的影响

根据开采沉陷学理论,在工作面开采的最前端(即距开切眼最远端)的典型塌陷区寻找裂缝,监测时间自 6 月 8 日起,此时井下工作面开采至 800 m 左右,地表出现明显的地裂缝时,分别对相对出露侧和塌陷侧进行动态观测,如图 1b 所示。为了减小地形起伏、植被覆盖、光照、露水、蒸发等对表层含水量的影响,定每天 9:00 为固定观测时间,选取地形相

对平坦、周围无植被覆盖的区域,采用监测频率为一天一次的监测方法进行水分含量持续动态监测,直到不同距离上的各监测条带监测的水分含量监测值相同(即各监测条带的土壤体积含水量相同,此时裂缝对周边土壤水分无影响)为止;为了减小测量误差,随机选取了 16 条裂缝记录其发育周期,并同时对这些裂缝的相对出露侧和相对塌陷侧进行监测,其中 14 条裂缝的发育周期为 7 d,其余一条为 8 d,一条为 6 d,因此将监测区内发育周期都为 7 d 的裂缝的等距离处含水量取平均值,作为该监测区土壤体积含水量。在平行于裂缝走向方向上分别垂直布设监测条带,各条监测条带之间间隔 30 cm,其中监测点从距离裂缝 10 cm 处开始布设,依次间隔 15 cm,至 130 cm 处为止,如图 1c 所示;同时选择矿区非塌陷区作为对照区 (CK),进行对比分析。

### 1.2.3 不同宽度裂缝对土壤水分的影响

在沉陷裂缝区,分别选取 2、5、9、13、17、24、32、35、38 mm 共 9 种不同宽度的裂缝,分别使用 TDR 测量不同宽度裂缝的不同距离 (10、25、40、55、70 cm) 处深 0~20 cm 的土壤含水量值,同样的选择矿区非塌陷区土壤含水量作为对照组 (CK) 进行对比分析。

## 2 土壤含水量计算分析

### 2.1 TDR 土壤含水量测量值的标定

将用 TDR 在深度 20 cm 测量的土壤含水量与干烧法测得的土壤含水量这 2 组数据做线性回归分析, 得出回归方程

$$Y=0.125+1.169X, R^2=0.91$$

式中,  $X$  为 TDR 测得的含水量;  $Y$  为干烧法测得的含水量。

利用回归方程可将 TDR 测得的数据转换为土壤体积含水量。

### 2.2 动态裂缝对出露侧土壤表层 20 cm 处含水量的影响

由表 1 可见, 各个观测距离的土壤含水量的最大值基本相同, 而土壤含水量的最小值则随着测点至裂缝距离增大而增大, 测点至裂缝距离大于

70 cm, 土壤含水量趋于平缓不再变化; 变异系数在测点至裂缝距离为 70 cm 以内随距离增大而减小, 在测点至裂缝距离大于 85 cm 至 CK 区基本不再变化, 稳定在 1% 左右; 标准差分析结果表明, 各组标准差值总体上随着测点至裂缝距离增大而减小; 说明裂缝对周围土壤的含水量的影响程度随测点至裂缝距离为的增大而减小。土壤表层含水量在测点至裂缝距离为 10~70 cm 处随距离的增大而增大, 超过 70 cm 后含水量基本保持稳定。在为了更好地揭示裂缝对相对露出侧含水量的影响范围, 采用 SAS9.2 对各采样条带的数据进行了差异性分析: 10、25、40、55、70 cm 均与 CK 区形成显著性差异 ( $P<0.05$ ), 而 CK 区与 130、115、100、85 cm 处的差异均不显著。所以, 在相对露出侧, 动态裂缝在 20 cm 深处对土壤含水量的影响范围在 70 cm 左右。

表 1 裂缝相对露出面不同距离处的观测指标

Table 1 Observing indexes at upper sides to cracks

测点至裂缝距离/cm	土壤含水量标准差	土壤含水量/%		变异系数/%	显著性差异
		最小值	最大值		
10	0.88	3.75	6.20	18.05	4.86±0.227D
25	0.71	4.10	6.20	13.92	5.14±0.185D
40	0.61	4.57	6.32	11.28	5.37±0.156CD
55	0.42	5.03	6.20	7.58	5.60±0.110C
70	0.21	5.74	6.32	3.43	6.06±0.054B
85	0.07	6.09	6.32	1.16	6.24±0.019A
100	0.07	6.09	6.32	1.10	6.20±0.018A
115	0.10	6.09	6.44	1.55	6.25±0.025A
130	0.08	6.20	6.44	1.20	6.30±0.025A
CK	0.06	6.20	6.32	0.94	6.27±0.015A

注: “±”前后的数据分别为平均值和标准误差; 数据后不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著, 相同字母表示在 0.05 的水平上差异不显著; CK 为对照组。

为了深入探究在相对露出侧动态裂缝对 20 cm 深处的土壤含水量的影响周期, 则需要分析各条带的含水量损失情况随时间的变化, 因此要选择一个不受裂缝影响的条带作为含水量的基准值, 根据表 1 可知, CK 区条带处的标准差、变异系数、含水量差值最小、最稳定, 以 CK 区条带处的含水量作为基准值, 测点至裂缝距离 10~70 cm 以内的水分损失量变化最为明显, 测点至裂缝距离为 85 cm 至 CK 区含水量的损失基本没有变化(图 2), 这也印证了由表 1 得出的动态裂缝在 20 cm 深处对相对露出侧土壤含水量的影响范围在 70 cm 左右的结论。

裂缝处水分蒸发除了垂直蒸发, 同时还存在侧向蒸发<sup>[23]</sup>。裂缝出现的第 1 天时, 各条带的含水量基本没有损失, 因为裂缝开裂宽度过小( $<2$  mm),

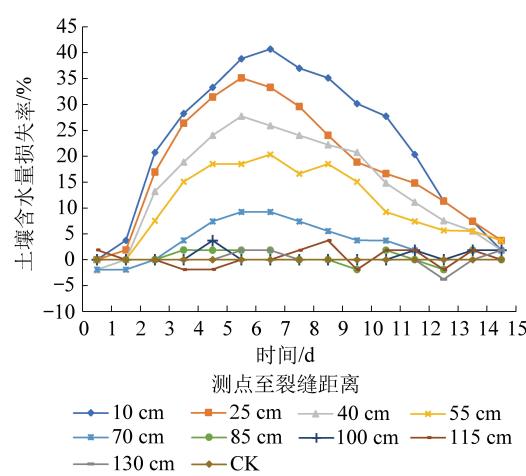


图 2 裂缝相对露出侧土壤表层水损失率随时间的变化

Fig.2 Variation of water loss percentage of soil surface with cracks at upper sides

水分通过裂缝侧向的开裂面蒸发量极小;以受影响最强烈的 10 cm 条带处为例,水分损失量在第 2~4 天上升速度最快,这段时间裂缝开裂宽度最大(裂缝发育中期),相对表面积最大,土壤水分蒸发速度最快;第 4~7 天内含水量损失率增速放缓,在第 7 天时,土壤损失量达到峰值,损失量高达 40.69%,这段时间裂缝已经逐渐开始闭合,相对表面积开始减小,土壤水分蒸发速度放缓,但仍然继续蒸发;第 8~15 天时,土壤含水量损失率开始下降,因为第 8 天时,裂缝已完全闭合,土壤侧面的蒸发通道已经关闭,水分得以开始恢复,在第 15 天时,含水量已经得到基本恢复;结合其他不同距离的条带整体来看,土壤含水量损失达到峰值只花费了 5 d,恢复到稳定的正常水平则花费了 8 d,水分恢复花费的时间更长一点,因此在相对露出侧动态裂缝对 20 cm 深处的土壤含水量的影响周期为 13 d。

表 2 裂缝相对塌陷侧不同距离处的观测指标  
Table 2 Observing indexes at lower sides to cracks

测点至裂 缝距离/cm	土壤含水量 标准差	土壤含水量/%		变异系数/%	显著性差异
		最小值	最大值		
25	0.64	4.45	6.09	12.06	5.33±0.166CD
40	0.41	5.03	6.2	7.23	5.64±0.105C
55	0.09	5.97	6.2	1.53	6.12±0.024B
70	0.07	6.09	6.32	1.2	6.22±0.019A
85	0.06	6.09	6.32	0.97	6.22±0.016A
100	0.07	6.09	6.32	1.11	6.23±0.018A
115	0.08	6.09	6.32	1.36	6.24±0.022A
130	0.06	6.2	6.3	1	6.27±0.016A
CK	0.06	6.2	6.32	0.94	6.27±0.015A

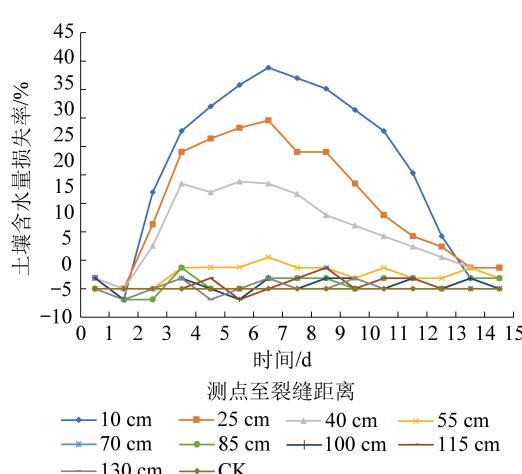


图 3 裂缝相对塌陷侧土壤表层水损失率随时间的变化

Fig.3 Variation of water loss percentage of soil surface with cracks at lower sides

### 2.3 动态裂缝对塌陷侧土壤表层 20 cm 处含水量的影响

从表 2 可以看出,在塌陷侧,各个观测距离的土壤含水量的最大值基本相同,而土壤含水量的最小值则随着测点至裂缝距离增大而增大,40 cm 以后趋于平缓;标准差和变异系数在 10~55 cm 处随测点至裂缝距离的增大而减小,超过 55 cm 后两者数据变化基本稳定;说明裂缝对周围土壤的影响程度在 10~55 cm 范围内随着测点至裂缝距离增大而减小。为了更好地揭示裂缝对周边含水量的影响范围,采用 SAS9.2 对各采样条带的数据进行了差异性分析:测点至裂缝距离为 10、25、40、55 cm 处均与 CK 区处形成显著性差异 ( $P < 0.05$ ),而 CK 区与 130、115、100、85、75 cm 处的差异均不显著。所以在相对塌陷侧,动态裂缝在 20 cm 深处对土壤含水量的影响范围在 55 cm 左右。

同理,为了深入探究在相对露出侧动态裂缝对 20 cm 处的土壤含水量的影响周期,也以 CK 区条带处的含水量作为基准绘制了裂缝相对塌陷侧土壤表层含水量损失率随时间的变化(图 3),裂缝出现的第 1 天时,各条带的含水量与相对露出侧表现一样,基本没有损失,因为裂缝开裂宽度过小( $<2$  mm),水分通过裂缝的开裂面蒸发量极小;同样以 10 cm 为例,水分损失量在第 2~7 天内快速上升,在第 7 天时,土壤损失量达到峰值,损失量高达 40.69%,第 8~14 天时,土壤含水量损失率开始下降,规律与裂缝相对露出侧的规律基本一致,但相对塌陷侧的含水量恢复到稳定的正常水平花费了 7 d,水分恢复花费的时间比相对露出侧少 1 d,因此在相对露出侧动态裂缝对 20 cm 深处的土壤含水量的影响周期为 12 d,可以看出相对塌陷侧的水分恢复地更快,而且总体上相对塌陷侧的平均含水量比相对露出侧的平

均含水量高出2.07%，原因是采煤扰动使露出侧高度高于塌陷侧，露出侧的蒸发面积略大于塌陷侧，从而导致塌陷侧的水分略微高于露出侧。

#### 2.4 不同宽度裂缝对土壤水分的影响

由3.2节和3.3节得出的结论可知，裂缝对土壤含水量的影响不超过70 cm，因此仅分析距离不同宽度裂缝70 cm以内的土壤含水量变化情况，由图4可知，宽度为2、5 mm的裂缝与CK区的土壤含水量几乎持平，在不同测点至裂缝距离处无明显差异；当裂缝宽度 $\geq 9$  mm时，土壤含水量变化明显，当裂缝宽度相同时，测点至裂缝距离越远，土壤含水量越

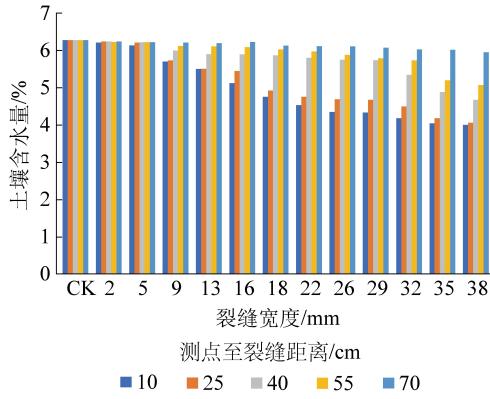


图4 不同宽度的裂缝对土壤含水量的影响

Fig.4 Effect of cracks with different widths on soil water content

表3 不同宽度裂缝的土壤表层含水量

Table 3 Soil water content of cracks with different widths

裂缝宽度/mm	不同测点至裂缝距离下土壤含水量显著性差异				
	10 cm	25 cm	40 cm	55 cm	70 cm
2	6.21 $\pm$ 0.027A	6.24 $\pm$ 0.025A	6.24 $\pm$ 0.032A	6.23 $\pm$ 0.033A	6.24 $\pm$ 0.019A
5	6.13 $\pm$ 0.039A	6.21 $\pm$ 0.035A	6.22 $\pm$ 0.036A	6.22 $\pm$ 0.030A	6.22 $\pm$ 0.028A
9	5.70 $\pm$ 0.090B	5.73 $\pm$ 0.065B	5.99 $\pm$ 0.044B	6.12 $\pm$ 0.024B	6.21 $\pm$ 0.031B
13	5.50 $\pm$ 0.079B	5.51 $\pm$ 0.062C	5.90 $\pm$ 0.052C	6.10 $\pm$ 0.051BC	6.20 $\pm$ 0.035B
16	5.12 $\pm$ 0.050C	5.45 $\pm$ 0.071C	5.89 $\pm$ 0.039C	6.09 $\pm$ 0.043BC	6.23 $\pm$ 0.028B
18	4.75 $\pm$ 0.062D	4.93 $\pm$ 0.049D	5.87 $\pm$ 0.066C	6.02 $\pm$ 0.053BC	6.13 $\pm$ 0.032B
22	4.53 $\pm$ 0.081E	4.75 $\pm$ 0.066E	5.81 $\pm$ 0.059CD	5.97 $\pm$ 0.043C	6.11 $\pm$ 0.026B
26	4.35 $\pm$ 0.062EF	4.68 $\pm$ 0.087EF	5.75 $\pm$ 0.058CD	5.88 $\pm$ 0.058CD	6.10 $\pm$ 0.032BC
29	4.33 $\pm$ 0.064EF	4.67 $\pm$ 0.091F	5.74 $\pm$ 0.060D	5.79 $\pm$ 0.062D	6.07 $\pm$ 0.022BC
32	4.18 $\pm$ 0.061F	4.50 $\pm$ 0.097F	5.35 $\pm$ 0.094E	5.73 $\pm$ 0.060D	6.02 $\pm$ 0.032C
35	4.05 $\pm$ 0.072F	4.18 $\pm$ 0.060G	4.88 $\pm$ 0.096F	5.20 $\pm$ 0.090E	6.02 $\pm$ 0.054C
38	4.00 $\pm$ 0.071F	4.06 $\pm$ 0.078G	4.67 $\pm$ 0.095G	5.07 $\pm$ 0.094E	5.95 $\pm$ 0.039C
CK	6.27 $\pm$ 0.015A	6.27 $\pm$ 0.015A	6.27 $\pm$ 0.015A	6.27 $\pm$ 0.015A	6.27 $\pm$ 0.015A

注：“ $\pm$ ”前后的数据分别为平均值和标准误差；数据后不同字母表示在0.05的水平上差异显著，相同字母表示在0.05的水平上差异不显著。

### 3 结论与展望

1) 在采煤过程形成的动态裂缝中，在相对露出

高；当测点至裂缝距离相同时，土壤含水量随裂缝宽度的增大而减少。

由表3可知，相对于对照区(CK)的土壤含水量，在测点至裂缝距离为10、25、40、55、70 cm处，宽度为38 mm的裂缝含水量分别损失了36.27%、35.28%、25.59%、19.13%、5.09%，宽度为29 mm的裂缝含水量分别损失了30.93%、25.59%、8.57%、7.70%、3.23%，宽度为18 mm的裂缝含水量分别损失了24.22%、21.49%、6.46%、3.97%、2.36%，宽度为9 mm的裂缝分别损失了9.19%、8.70%、4.47%、2.48%、0.99%，宽度为2、5 mm的裂缝的土壤含水量损失不到2%，影响可忽略不计；根据显著性差异描述可知，在裂缝宽度为2、5 mm时，与裂缝不同距离处的土壤含水量均与CK区的土壤含水量无显著性差异( $P>0.05$ )，在裂缝宽度为9、13、17、24、29、32、35、38 mm时，土壤含水量与对照区(CK)的差异显著，且在距离裂缝位置相同时，不同宽度裂缝之间的土壤含水量的差异性也尤为显著( $P<0.05$ )，原因可能是由于宽度在2、5 mm的裂缝导致的侧向蒸发面积过小，对土壤含水量的影响极为有限；裂缝宽度在 $\geq 9$  mm时，裂缝宽度较为明显，侧向的蒸发面积明显，土壤持水能力随裂缝宽度的增大而大大减弱，因此对土壤含水量的影响较大。

侧，动态裂缝在20 cm深处对土壤含水量的影响范围在70 cm左右，影响周期为13 d；在相对塌陷侧，动态裂缝在20 cm深处对土壤含水量的影响范围在

55 cm 左右,影响周期为 12 d; 相对塌陷侧的含水量比相对露出侧的含水量高出 2.07%,且相对塌陷侧的水分恢复地更快。采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量虽有影响,但在土壤自修复的作用下,含水量在两周左右时间内都可以得到基本恢复。

2) 对不同宽度裂缝周围含水量对比可知,宽度在 5 mm 以内的裂缝对土壤含水量的影响甚微,对于宽度 9 mm 以上的裂缝,当裂缝宽度相同时,距离裂缝位置越远,土壤含水量越高,说明土壤含水量受距离的影响较大; 在距离裂缝相等时, 裂缝宽度越大, 土壤含水量随着裂缝宽度的增加逐渐减小, 说明随着裂缝宽度的增大, 土壤结构变得松散, 增加了与空气的接触面积, 导致水分散失严重, 土壤含水量降低; 说明风沙区采煤塌陷裂缝在一定程度上破坏了土壤的储水能力。

3) 在今后的土地复垦与生态重建时,应该充分考虑到土壤的自修复能力,同时在实地野外工作中,发现了大量的土壤结皮现象的出现,但较为脆弱,因此需要减少人为践踏或机械碾压等活动; 针对宽度较大的无法闭合的裂缝,应及时填补,减少水分蒸发。为完善采煤塌陷地土壤水含量的研究,在接下来的研究中,会针对采空塌陷区进行采煤塌陷后的多时序监测。

## 参考文献(References):

- [1] LI Y, CHIU Y, LIN T Y. Coal production efficiency and land destruction in China's coal mining industry [J]. Resources Policy, 2019, 63: 101449.
- [2] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].煤炭学报,2020,45(1):351-359.  
HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on the “environmental mining and restoration” of coal mine area [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):351-359.
- [3] 许家林.煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J].煤炭科学技术,2020, 48(9):1-15.  
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020,48(9):1-15.
- [4] 李涛,李文平,常金源,等.陕北浅埋煤层开采隔水土层渗透性变化特征[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):127-131,137.  
LI Tao, LI Wenping, CHANG Jinyuan, et al. Characteristics of permeability change of water-repellent soil layer in shallow coal seam mining in northern Shaanxi[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011,28(1):127-131,137.
- [5] 范立民,孙魁,李成,等.西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J].煤炭学报,2020,45(1):317-329.  
FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Background, ideas and methods of groundwater monitoring in large-scale coal bases in Northwest China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):317-329.
- [6] QIAO W, LI W, LI T, et al. Effects of coal mining on shallow water resources in semiarid regions: a case study in the Shennan mining area, Shaanxi, China [J]. Mine Water and the Environment, 2017, 36(1): 104-113.
- [7] 钱者东.干旱半干旱地区煤矿开采生态影响研究[D].南京:南京师范大学,2011.  
QIAN Zhedong. Research on the ecological impact of coal mining in arid and semi-arid areas [D]. Nanjing : Nanjing Normal University, 2011.
- [8] 戴华阳,罗景程,郭俊廷,等.上湾矿高强度开采地表裂缝发育规律实测研究[J].煤炭科学技术,2020, 48(10):124-129.  
DAI Huayang, LUO Jingcheng, GUO Junting, et al. In-site surveying and study on development laws of surface cracks by high-intensity mining in Shangwan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 124-129.
- [9] UWE Buczko, HORST H Gerke. Estimating spatial distributions of hydraulic parameters for a two-scale structured heterogeneous lignitic mine soil[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1):109-124.
- [10] ZHANG Fawang, SONG Yaxin, ZHAO Hongmei, et al. Changes of Precipitation Infiltration Recharge in the Circumstances of Coal Mining Subsidence in the Shendong Coal Field, China [J]. Acta Geologica Sinica( English Edition ), 2012,86(4):993-1003.
- [11] HU Z, YANG G, XIAO W, et al. Farmland damage and its impact on the overlapped areas of cropland and coal resources in the eastern plains of China [J]. Resources Conservation and Recycling, 2014, 86:1-8.
- [12] DOUGILL A J, HEATHWAITE A L, THOMAS D S G. Soil water movement and nutrient cycling in semi-arid rangeland: vegetation change and system resilience[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(3):443-459.
- [13] 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.  
LEI Shaogang, BIAN Zhengfu. Study on the environmental impact of coal mining in the arid area of western China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(11):2837-2843.
- [14] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003(4):413-420.  
CHEN Hongsong, SHAO Mingan. Research progress on the mechanism of soil water movement and transformation on slope land in the loess area [J]. Advances in Water Sciences, 2003(4):413-420.
- [15] 邹慧,黄兴法,龚时宏.水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响[J].农业机械学报,2012,43(9):72-77.  
ZOU Hui, HUANG Xingfa, GONG Shihong. Effects of water deficit adjustment on water and heat dynamics of summer corn field with subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012,43(9):72-77.
- [16] 余冬立.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植被恢复的水土环境效应研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2009.  
YU Dongli. Soil and water environmental effects of vegetation restoration in small watersheds in the water and wind erosion in-

- terlaced zone of the loess plateau[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment of the Ministry of Education), 2009.
- [17] 吴丽,田俊峰,汤洋,等.干旱半干旱矿区采煤裂缝对土壤水分的影响研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):115-120.  
WU Li, TIAN Junfeng, TANG Yang, et al. Study on the effect of coal mining cracks on soil moisture in arid and semi-arid mining areas [J]. South - to - North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology, 2019,17(3):115-120.
- [18] 赵红梅,张发旺,宋亚新,等.大柳塔采煤塌陷区土壤含水量的空间变异特征分析[J].地球信息科学学报,2010,12(6):753-760.  
ZHAO Hongmei, ZHANG Fawang, SONG Yaxin, et al. Analysis of spatial variability of soil water content in Daliuta coal mining subsidence area [J]. Journal of Earth Information Sciences, 2010, 12(6):753-760.
- [19] 何金军,魏江生,贺晓,等.采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响[J].煤炭科学技术,2007(12):92-96.  
HE Jinjun, WEI Jiangsheng, He Xiao, et al. Effects of coal mining collapse on soil physical properties in loess hilly region [J]. Coal Science and Technology, 2007(12):92-96.
- [20] 魏江生,何金军,高永,等.黄土丘陵区土壤水分时空变化特征对采煤沉陷的响应[J].水土保持通报,2008(5):66-69,103.  
WEI Jiangsheng, HE Jinjun, GAO Yong, et al. The response of spatio-temporal variation characteristics of soil moisture to coal mining subsidence in the Loess Hilly Region [J]. Soil and Soil Conservation Bulletin, 2008(5):66-69,103.
- [21] 张延旭,毕银丽,陈书琳,等.半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J].环境科学与技术,2015,38(3):11-14.  
ZHANG Yanxu, BI Yinli, CHEN Shulin, et al. Effect of crack development on soil moisture after coal mining in semi-arid aeolian sand area [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(3):11-14.
- [22] 何满潮.长壁开采顶短壁梁理论及其110工法:第三次矿业科学技术变革[J].煤矿支护,2016(3):3-12.  
HE Manchao. The theory of long-wall mining and cutting short-wall beams and its 110 construction methods - the third mining science and technology revolution [J]. Coal Mine Support, 2016(3):3-12.
- [23] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504.  
MA Yingbin, HUANG Yaru, WANG Huailiang, et al. Effects of coal mining collapse cracks on slope soil moisture after rainfall [J]. Acta Sinica, 2014, 51(3):497-504.