

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0066

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 L, TIAN J F, TANG Y, et al. Effects of collapse-fissure on soil moisture in arid and semi-arid mining areas[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 115-120. (in Chinese)

干旱半干旱矿区采煤裂缝对土壤水分的影响研究

吴丽^{1,2,3}, 田俊峰¹, 汤洋⁴, 朱哲⁴

(1. 河南城建学院 市政与环境工程学院, 河南 平顶山 467000; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河南城建学院 河南省水体污染防治与修复重点实验室, 河南 平顶山 467036;

4. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究采煤塌陷裂缝对土壤水分的影响,选取了阜新塌陷区为研究区,应用系统聚类、Mann-Kendall 秩次相关检验法及多元线性回归等数理统计的方法,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。研究表明,研究区土壤容重随着埋深线性增大,且容重的变化幅度具有明显的突变点,连通裂缝、隐伏裂缝和非塌陷区的突变点位置分别为 50、70 和 150 cm;同一尺度不同深度裂缝处,裂缝宽度对土壤含水率的影响随深度的增加而减小;在同裂缝同深度情况下,随着与裂缝距离的增加土壤含水率越高,至 2 m 后影响不明显。裂缝尺度影响了土壤含水量的空间分布特征,裂缝尺度的增大使得土壤含水率平均偏差增大。

关键词:矿区;采煤裂缝;土壤容重;土壤水分

中图分类号: X37 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of collapse-fissure on soil moisture in arid and semi-arid mining areas

WU Li^{1,2,3}, TIAN Junfeng¹, TANG Yang⁴, ZHU Zhe⁴

(1. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Henan University of Urban Construction, Henan Province Key Laboratory of Water Pollution Control and Rehabilitation Technology, Pingdingshan 467036, China; 4. Mining Institute of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The variation characteristics of soil bulk density at different depths of collapse fissures is studied at Fuxin in this study in order to quantify the effects of coal mining subsidence on soil moisture. The relationships between the width of the collapse fracture, the distance from the crack and the water content of the soil were explored with hierarchical clustering, the Mann-Kendall rank correlation and the multiple linear regression. The results indicate that the soil bulk density increases linearly with the depth in the study area, and there are obvious changing points. The locations of these changing points of connected cracks, concealed cracks and non-collapse areas are 50, 70 and 150 cm, respectively. The effects of crack width on soil water content decrease with the depth at different depth cracks with the same width. Under the condition of the same crack and depth, the soil moisture content will then increase with the distance from the crack. The crack width obviously enhance the soil moisture con-

收稿日期: 2018-11-23 修回日期: 2019-03-06 网络出版时间: 2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190321.1527.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51404134); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室(水利部南京水文水资源研究所; 河海大学) 开放课题基金(2017490611)

作者简介: 吴丽(1981—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 讲师, 主要从事矿区水文地质、包气带土壤水分运移方面研究。E-mail: wuli_water@163.com

tent, and an increase in the crack width usually leads to an increase of the average soil moisture content.

Key words: mining area; collapse-fissure; soil bulk density; soil moisture

我国是煤炭大国,开采方式主要为井工开采,煤矿开采形成的塌陷造成包气带岩土结构改变,使得垂向裂隙在包气带中发育,从而增加了水分入渗通道,另一方面又加大了水分蒸发面积^[2]。对于干旱半干旱区非降雨期间,在裂隙处及土壤结构松散处,包气带水分蒸发强烈,水分损失严重;而降雨较多时,雨水部分补给表层土壤后,积水情况下则由塌陷裂隙通道形成优先流^[3],使得同等降雨条件下入渗深度增加,土壤含水率均匀性变差,因此,在干旱半干旱矿区,采矿塌陷裂缝造成包气带土壤含水率严重降低,矿区植被环境遭到破坏,矿区生态环境日趋恶化^[4]。

近年来,随着采煤塌陷生态问题的日益凸显,越来越多的专家学者致力于研究矿区土壤水分特征变化。对于矿区土壤水力传导系数、土壤含水量等土壤水分特征的研究,德国的 Uwe Buczko 等^[5]首次以褐煤矿为研究背景,对二维非均质土壤进行了水力参数空间分布的估算研究,为矿区土壤水分研究奠定了基础;2007 年张发旺研究员^[2]最先系统性的研究了采矿塌陷对包气带土壤水分的影响,并定性的分析了塌陷区包气带土壤水分运移状况;随后杨泽元^[6]、张延旭^[7]、邹慧^[8]等研究了陕北矿区土壤水分变化、土壤结构特征变化等;陈秋计^[9]通过室内重构实验测定了塌陷结构对土壤水分的影响;杜国强等^[10]通过野外现场试验,对垂直裂缝方向上的土壤含水率和地表剪切强度进行测定并进行相关性分析。马迎宾等^[11-12]从塌陷裂缝的不同角度出发研究了坡面对土壤含水率的影响。目前已有研究中对塌陷区土壤含水率的变化影响较多,但其多数为定性分析,并没考虑裂缝尺度及裂缝形式对土壤容重及含水率的影响。通过笔者对矿区塌陷区调研,阜新市清河门区采煤造成大面积塌陷、地裂缝,该区土壤类型为棕壤土,主要种植作物为玉米,随着采煤塌陷,该地区作物成活率低,作物产量锐减。因此,本研究从干旱半干旱地区塌陷区土壤容重及裂缝对土壤水分的影响入手,分析采煤塌陷区容重随深度的变化趋势、不同形式裂缝对土壤含水率的影响,并通过与非塌陷区土壤容重及含水率观测结果对比,得出塌陷裂缝土壤容重及对土壤含水率的影响规律,为塌陷区包气带土壤水分进一步研究打下基础,同时为该类型矿区生态恢复及土地

复垦提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于辽宁省阜新市清河门区,属大陆性季风气候,平均年降水量 544.7 mm,降雨多集中在 6—9 月,年平均气温 7.5 °C,平均年蒸发量为 1 789 mm,降水量与蒸发量之比为 0.304,属于干旱半干旱区^[13]。全年气候表现为多干旱(春季尤其),多风,风力较大,一般 5~6 级。研究区地标标高为 +120~+125,土壤类型主要为棕壤土,土壤质地粗,容重大,孔隙度小,主要粮食作物为玉米和高粱。矿区内地质条件复杂,由于采矿引起大面积地面塌陷、地下水渗漏,造成区域内生态环境破坏严重^[13]。

1.2 样地设置

为研究塌陷裂缝对土壤水分的影响,在研究区选取典型塌陷地段进行长期取样监测。所选样地位于清河门区艾友村艾友立井和清河门矿中间塌陷区,研究区经度为 1.478°,纬度为 41.799°,所选区域地势较为平坦,土质条件、相对高程基本一致。研究区到处存在宽度不一的裂缝,基本为东北-西南走向,其中还有大的塌陷坑存在。这是因为研究区东北方向为艾友矿,西南为清河门矿,且两矿在开采过程中底部连通,从而在采空区形成上部塌陷坑及塌陷裂缝。在塌陷区由于农业生产及生活的需要,塌陷后通过相关治理,部分塌陷裂缝表层被填埋,但通过开挖仍能发现在深部存在隐伏裂缝。

1.3 试验方法

在样地沿塌陷裂缝总体走向的中心线,选取若干个 2 m×2 m 的样方观测裂缝的条数与宽度,为了观测的准确性,在该样方顺延得到 4 m×4 m 的样方,在此区域观测裂缝的条数与宽度,裂缝宽度用直尺测量,精度精确到 0.01 m,统计裂缝宽度并进行分类,选择不同宽度的典型地裂缝并进行标记,根据裂缝宽度将裂缝分为微尺度、小尺度、中尺度和大尺度,具体划分见表 1。

表 1 塌陷裂缝尺度划分

Tab. 1 Classifications of collapse-fissure scale

尺寸	<1 cm	1~10 cm	10~40 cm	>40 cm
分类	微尺度	小尺度	中尺度	大尺度

根据裂缝呈现特征,将裂缝分为连通裂缝、隐伏裂缝,见图1。

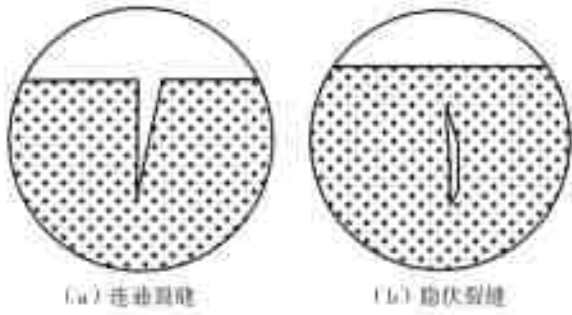


图1 塌陷区裂缝示意图

Fig.1 Schematic diagram of cracks in subsidence areas

分别在连通裂缝、塌陷裂缝及非塌陷区挖取2 m剖面,并用环刀取样,测定裂缝0~200 cm不同深度处土壤容重。取土深度为40 cm,研究裂缝深度均为40 cm以上,在距各裂缝0、0.5、1、2、3、5 m的地方原位取土,每个土样重复取3~5个取平均。取样时间为2015年3月12日,研究区连续15 d降雨。

土壤含水率计算公式为

$$\omega = W/m \quad (1)$$

式中: ω 为土壤含水率(g/kg), W 为土壤含水量(g), m 为干土质量(kg)。

1.4 试验数据分析方法

为对试验所得数据进行分析,本文主要采用了系统聚类法分析土壤水分突变情况,采用Mann-Kendall秩次相关检验法^[14](M-K秩次相关检验法)分析土壤水分随深度的变化趋势,采用多元线性回归方法^[15]分析裂缝区及非裂缝区土壤水分变化与深度及裂缝尺度的相关关系。

1.4.1 突变点的系统聚类法识别

系统聚类法在聚类分析中,通过计算数据对象之间的差异度来判断是否相似,数据对象的属性取值不同时,差异度的计算方法也不同。该方法中计算各类间距离的方法有欧式距离、平方欧式距离、夹角余弦距离、皮尔逊相关系数法等,本文中进行聚类的序列为容重和埋深序列,根据分析本研究区容重与埋深具有一定相关关系,所以本文采用皮尔逊相关系数法来计算各类间的距离。其步骤如下。

(1)初始分类。对于上述容重序列 $\{x_i\}$,令 $k=0$,每个模式自成一类,即 $G_i^{(0)} = \{\vec{x}_i\} (i=1,2,\dots,n)$ 。

(2)计算各类间的距离 D_{ij} 。生成一个对称的距离矩阵 $D^{(k)} = (D_{ij})_{m \times m}$, m 为类的个数。

$$\cos(x, y) = \frac{\sum_i x_i y_i}{n-1} \quad (2)$$

式中: Z_{x_i} 是 x_i 的标准值。

(3)求出第(2)步所得的矩阵 $D^{(k)}$ 中的最小项 $\min^{(k)}(D_{ij})$ 。设 $G_i^{(k)}$ 和 $G_j^{(k)}$ 的距离为 $\min(D^{(k)})$,合并 $G_i^{(k)}$ 和 $G_j^{(k)}$ 为一类,得到新的聚类 $G_1^{(k+1)}, G_1^{(k+1)}, \dots$,并令 $m=m-1$ 。

(4)检查类的个数 m 。首先指定聚类数 M ,如果 $m > M$,则令 $k=k+1$,转至步骤(2),否则,聚类结束。

当某次循环中具有最小类间距离不止一个类对时,则可将这些具有最小距离的类同时合并。

本文为检测容重序列中突变点,在聚类过程中将聚类数取为2,将序列中聚类为2的埋深值识别为突变点。

1.4.2 M-K秩次相关检验法

在统计学中,M-K秩次相关检验法^[14-15]是比较常用的时间序列趋势检验方法之一。M-K秩次相关检验法不需要样本遵从一定的分布,能够将少数异常值剔除,适用于非正态分布数据的检验。对于容重序列 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,M-K秩次相关检验统计量 Z 由下面公式计算

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_t (t-1)(2t+5)]}{18} \quad (6)$$

式中: t 是给定的样本个数; \sum_t 代表统计量样本的总和。当 Z 为正值(负值)时,表示时间序列呈上升(下降)趋势。给定显著性水平 α ,如果 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$,则拒绝无趋势的假设,即认为容重序列 \mathbf{X} 存在趋势性;否则接受序列 \mathbf{X} 无趋势的假设。 $Z_{(1-\alpha/2)}$ 为概率超过 $\alpha/2$ 的标准正态分布值。

1.4.3 多元线性回归

对于不同位置处土壤容重,假定因变量容重 \mathbf{X} 与自变量埋深 d_1, d_2, \dots, d_n 间存在线性关系,其数学模型为

$$x_j = \beta_0 + \beta_1 d + \epsilon_j \quad (7)$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \epsilon_j$ 是与 d 无关的未知参数; \mathbf{X} 称为实测容重的随机变量,随 d 而变,受试验误差影响; ϵ_j 为相互独立且都服从 $N(0, \sigma^2)$ 的随机变量。根据实际

观测值对 β_0 、 β_1 以及方差 σ^2 做出估计。式中参数 β_0 、 β_1 、 ϵ_j 可用最小二乘法估计。

2 结果与分析

2.1 塌陷对土壤容重的影响

试验区塌陷裂缝和隐伏塌陷裂缝土壤容重在 0~200 cm 深度范围内较大,塌陷裂缝处容重为 1.533 g/cm³,范围在 1.447~1.612 g/cm³,变异系数为 0.033 5,非塌陷裂缝处容重均值为 1.517 g/cm³,范围在 1.468~1.556 g/cm³,变异系数为 0.018 5,两区土壤容重在垂向上平均值差异较小,塌陷区容重变异性较大。而连通裂缝区土壤容重范围为 1.235~1.585 g/cm³,离散性最大。详见图 2。

通过系统聚类分析方法分析不同位置处土壤容重变化趋势,得到连通裂缝与隐伏裂缝的突变点分别为 50 cm 与 70 cm 处,而非塌陷区的土壤容重突

变点为 150 cm 处,经检验隐伏裂缝与连通裂缝土壤容重突变前后变化显著,而非塌陷区土壤容重突变前后变化不显著。为研究不同位置处土壤容重与深度的关系,采用最小二乘法原理,通过线性回归法得到突变点前后土壤容重与深度的关系,见表 2。

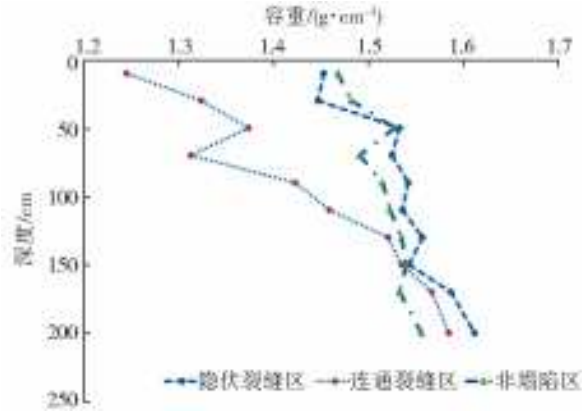


图 2 不同位置处土壤容重随深度变化
Fig. 2 Variations of soil bulk density with depth at different locations

表 2 不同位置处土壤容重 x 与深度 d 关系

Tab. 2 Relationship between soil density and depth at different positions

突变点位置	突变前线性关系	突变后线性关系	显著性检验结果
连通裂缝 50 cm 处	$x=0.0032d+1.218$	$x=0.002d+1.2273$	显著
隐伏裂缝 70 cm 处	$x=0.0015d+1.429$	$x=0.0007d+1.469$	显著
非塌陷区 150 cm 处	$x=0.0005d+1.473$	$x=0.0004d+1.477$	不显著

通过分析发现,不同位置处土壤容重均随着埋深的增加而具有一定的增加趋势,且在一定埋深处其容重增加幅度均减小,由表 2 看出,连通裂缝处和隐伏裂缝处突变点后容重变化幅度大,而非塌陷区突变点前后土壤容重变化不明显。连通裂缝、隐伏裂缝、非塌陷区处突变点深度逐渐增大,这主要因为裂缝区表层土壤在塌陷过程中受到拉张破坏力,使得裂缝处表层土壤结构松散,容重较低;随着埋深的增加,下部土壤在自身的固结及上部土层的压实作用下变得密实,而且研究区塌陷时间较长,土壤结构经历了最初的破坏、重组,以及长达几年的沉压、紧实,土壤密度与非塌陷区逐渐趋于一致。塌陷造成下部土层受上部土层挤压,使得下部土壤容重要大于非塌陷区,但其变化趋势基本一致。

2.2 土壤水分对塌陷裂缝的响应

为分析塌陷裂缝对土壤蒸发的影响,本研究将不同尺度裂缝对土壤水分的影响分四个土层进行研究,逐一分析不同尺度裂缝条件下不同深度不同距离处土壤水分的变化情况,得出裂缝宽度对土壤水分的影响。

2.2.1 连续无雨期塌陷裂缝处土壤含水率变化
采用 M-K 秩次相关检验法对图 3 中不同尺度

塌陷裂缝不同距离处土壤含水量进行趋势性检验得出,裂缝处,不同深度的土壤水分变化较显著,且随着取样点深度的增加,含水率有所升高,但其整体趋势变化不大。在 0.5 m 处裂缝对土壤含水率仍有较明显的影响,各层土壤含水率差异性不大,均随着裂缝宽度的增加含水率下降。而在距裂缝 2 m 和 5 m 处各土层含水率无明显变化趋势。

(1)不同尺度的采煤塌陷裂缝,在土壤表层 0~10 cm 层距裂缝 0 m、0.5 m 和 1 m 处,土壤含水率在各尺度排序裂缝处的变化是微尺度>小尺度>中尺度>大尺度,在 2 m、3 m、5 m 处,土壤含水率差别不大。

(2)在裂缝处,随着裂缝宽度的增加,不同深度处包气带土壤水分均呈下降趋势,且随着深度的增加,裂缝尺度对含水率的影响越显著。

(3)随着距裂缝距离的增加,裂缝对土壤含水率的影响越不显著,距裂缝 2 m 以上时各层土壤含水率变化与非塌陷区基本一致。

2.2.2 持续降雨后塌陷裂缝对土壤含水率的影响

为研究塌陷裂缝对降雨条件下包气带土壤水分分布的影响,调查阜新塌陷区雨后土壤水分变化情

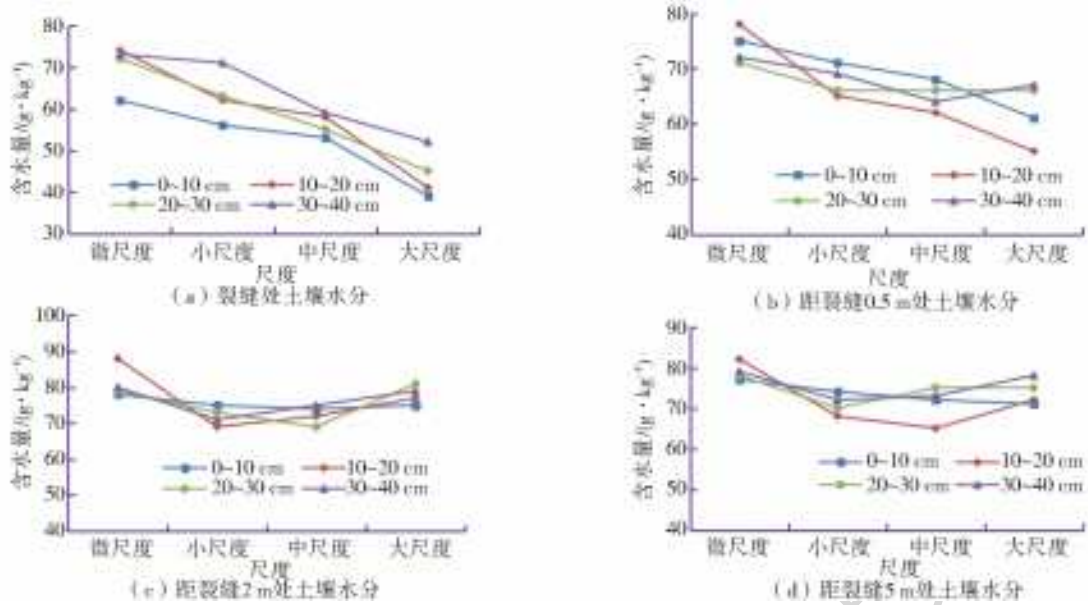


图3 雨前不同尺度塌陷裂缝不同距离处含水率变化

Fig. 3 Variation of water content for different scale collapse-fissure at different distances

况。2015年6月9—10日,由阜新市水文站测得清河门区降雨共85 mm,降雨后第1天(6月11日)及第10天(6月21日)各尺度分别选取3条裂缝,每条裂缝处取3~5个土样测定其含水率,裂缝处土壤水分分布统计情况见表3。

表3 雨后塌陷裂缝处土壤含水率变化统计

Tab. 3 Variations of soil water content for the collapse-fissure during drought period

尺度	日期	最小值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准 偏差
微尺度	6月11日	175	191	180	1.38
	6月21日	127	152	138	1.55
小尺度	6月11日	177	195	182	1.44
	6月21日	122	145	132	1.35
中尺度	6月11日	179	192	181	1.49
	6月21日	125	143	130	1.53
大尺度	6月11日	172	193	183	1.55
	6月21日	120	138	125	1.65

从统计结果看,降雨后,各裂缝处土壤含水率变化不大,各尺度裂缝不同测定日期含水率变化172~195 g/kg,各尺度处平均含水率在180~183 g/kg,土壤水分分布基本均匀,因为本次降雨雨量较大,降雨后裂缝的分布对表层土壤水分含量影响不大,表层土壤水分趋于饱和,土壤水分主要受土壤质地及容重的影响。10 d后,不同尺度裂缝处土壤含水率随着裂缝尺度的增大,平均含水率呈递减趋势,且随着裂缝尺度的增加,土壤含水率统计值偏差越大,这是由于日照及风的影响下,裂缝处土壤水分蒸发较快,而且由于塌陷使得土壤物理性质发生变化,从而

加大了土壤含水率的空间变异性。关于塌陷区土壤性质的空间变异性将作为下一步研究重点。

3 结论

通过对采煤裂缝及非塌陷区土壤含水率的对比研究,主要得出以下结论。

(1)塌陷裂缝影响土壤容重,随着深度的增加,土壤容重变化幅度降低,且对于连通裂缝及隐伏裂缝处均具有显著的突变点,突变点深度分别位于50 cm和70 cm处。随着深度的增加,土壤容重具有增大趋势,逐步趋近于非塌陷区土壤容重。

(2)土壤含水率与随距地裂缝距离的增加而逐渐增大,且随着裂缝尺度的增加,对土壤含水率的影响越大,且降雨后裂缝尺度越大,土壤水分损失越大。降雨前后,研究区各裂缝处土壤平均含水率由180~183 g/kg减小到125~138 g/kg,其标准差由1.38~1.55增大为1.35~1.65,裂缝的存在增加了土壤水分的空间变异性。

参考文献(References):

[1] 邵仁旭,翟洪波,谷建才,等. 干旱半干旱地区华北落叶松人工林不同密度的土壤水文研究——以塞罕坝机械林场为例[J]. 河北农业大学学报,2010,9(5):80-83. (SHAO R X, ZHAI H B, GU J C, et al. Study on soil hydrology of larix principis. Rupprechtii Mayr plantations of different densities in arid and semi-arid areas-A case study of Saihanba machine forest farm[J]. Journal of Agricultural University of HeBei, 2010, 9(5): 80-83. (in Chinese)).

- [2] 张发旺,赵红梅,宋亚新,等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 521-527. (ZHANG F W, ZHAO H M, SONG Y X, et al. The effect of coal-mining subsidence on water environment in the Shenfu-Dongsheng mining area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 521-527. (in Chinese)).
- [3] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 118-127. (WU Q H, ZHU G S, CUI H D, et al. Effect of precipitation intensities on preferential flow and its numerical modeling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 118-127. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 20. 015.
- [4] 王毅,江凯. 贾汪矿区采煤塌陷地的复垦和生态修复[J]. 中州煤炭, 2009, 118(4): 41-42. (WANG Y, JIANG K. Land reclamation and ecological restoration of coal mining subsidence area in jiawang district[J]. China Energy and Environmental Protection, 2009, 118(4): 41-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0506. 2009. 04. 019.
- [5] UWE BUCZKO, HORET H, GERKE. Estimating spatial distributions of hydraulic parameters for a twoscale structured heterogeneous lignitic mine soil[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1-4): 0-124.
- [6] 杨泽元,范立民,许登科,等. 陕北风沙滩地区采煤塌陷裂缝对包气带水分运移的影响: 模型建立[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 155-161. (YANG Z Y, FAN L M, XU D K, et al. Influence of fissures due to coal mining on moisture transportation in the vadose zone in the blown-sand region of the northern Shaanxi Province; Model establishment[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 155-161 (in Chinese)) DOI: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2016. 5037.
- [7] 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 Y X, BI Y L, CHEN S L, et al. Effects of subsidence fracture caused by coal-mining on soil moisture content in semi-arid windy desert area [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(3): 11-14. (in Chinese))
- [8] 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): 496-501. (ZOU H, BI Y L, ZHU B W, et al. Effect of mining subsidence on soil moisture dynamic changes of sandy land[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(3): 496-501. (in Chinese)). DOI: 10. 13247/j. cnki. jcumt. 000138.
- [9] 陈秋计,吴锦忠,侯恩科,等. 采煤塌陷裂缝区重构土壤水分特性研究[J]. 煤炭技术, 2015, 14(11): 308-310. (CHEN Q J, WU J Z, HOU E K. Reseach on moisture characteristic of reconstruction soil in area of coal mining subsidence crack [J]. Coal Technology, 2015, 14(11): 308-310. (in Chinese)) DOI: 10. 13301/j. cnki. ct. 2015. 11. 119.
- [10] 杜国强,陈秀琴,郗晨龙,等. 半干旱矿区地裂缝对土壤水分和地表剪切强度的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 224-228. (DU G Q, CHEN X Q, QIE C L, et al. Impacts of cracks on soil moisture and surface shear strength in semi-arid mining area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(2): 224-228. (in Chinese)) DOI: 10. 11934/j. issn. 1673-4831. 2016. 02. 009 .
- [11] 马迎宾,高永,张燕,等. 黄土丘陵区采煤塌陷裂缝对坡面土壤水分的影响[J]. 中国水土保持, 2013, 51(11): 54-57. (MA Y B, GAO Y, ZHANG Y, et al. Effect of mining subsidence cracks on soil moisture on slope in Loess Hilly area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013, 51(11): 54-57. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0941. 2013. 11. 021.
- [12] 马迎宾. 采煤塌陷裂缝对土壤水分及地上生物量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. (MA Y B. The effet of subsidence fissure on soil moisture and above-ground biomass [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. 2013. (in Chinese))
- [13] 钱纪良,林之光. 关于中国干湿气候区划的初步研究[J]. 地理学报, 1965, 31(1): 1-14. (QIAN J L, LIN Z G. A preliminary study on the regionalization of dry and wet climate in China[J]. Acta Geographica Sinica. 1965, 31(1): 1-14. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/xb196501001.
- [14] MANN H B. Non-parametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945(13): 245-259.
- [15] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.