

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.11

基于塌陷裂缝非连续均质的土壤水分扩散物理模拟

陈建平, 朱 哲, 吴 丽

(辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究被塌陷裂缝破坏的非连续均质土壤水分扩散情况, 分别在水平土柱中设置 0.5 mm、1 mm、5 mm、8 mm、11 mm、12 mm、15 mm 宽度的裂缝模拟塌陷裂缝进行入渗试验。观测湿润锋值的变化, 绘制含水率与 Boltzmann 参数、土壤水分扩散率的关系曲线, 分析裂缝对水分扩散的影响。结果表明: 湿润峰经过裂缝后锋面产生明显不一致性, 土壤水分扩散方式转变为上升的垂向扩散与水平扩散两种方式并存的二维扩散; $\lambda \sim \theta$ 关系曲线符合 Boltzmann 模型, 裂缝增大了土壤水分扩散程度; 通过单因素方差分析与偏相关分析, 得出裂缝与土壤水分扩散率呈显著负相关, 即随着裂缝的增大土壤水分的水平扩散率逐渐降低, 分析土壤水分扩散率与含水率关系曲线, 将试验结果分成四种情况评价裂缝对土壤水分扩散率的降低情况。研究成果为塌陷区土地复垦提供了参考。

关键词: 土壤水分扩散; 塌陷裂缝; 湿润峰; 含水率

中图分类号: S156.1; P164.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0066-07

Physical model test on moisture diffusion in discontinuous homogeneous soil with collapse-fissure

CHEN Jianping, ZHU Zhe, WU Li

(College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The paper studies the moisture diffusion in discontinuous homogeneous soil damaged by the collapse-fissure. The infiltration experiments were conducted in horizontal soil columns to simulate the collapse-fissure. The horizontal soil columns set fissures with widths of 0.5 mm, 1 mm, 5 mm, 8 mm, 11 mm, 12 mm, 15 mm, respectively. The study draws the relation curves of water content, Boltzmann parameter and soil moisture diffusivity by using the variation of wetting front value, and analyses the influence of fissure on moisture diffusion. The results show that (a) obvious inconsistency exists in wetting front value after fissure, and the diffusion mode of soil water is changed into two dimensional diffusion of vertical diffusion and horizontal diffusion, (b) the relation curve of $\lambda \sim \theta$ fits with the Boltzmann model, and the fissure increases the diffusion degree of soil moisture. Through analyzing the one-way variance and the partial correlation the relationship of fissure and soil moisture diffusivity exist apparent negative correlation, that is, soil horizontal diffusivity reduces with increasing fissure widths. Four types are proposed according to the test results to evaluate the reduce rate of soil moisture diffusion, by analyzing the curves of the soil moisture diffusivity and moisture content. The results provide references for the reclamation of collapse area.

Keywords: soil moisture diffusion; collapse-fissure; wetting front; water content

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51404134)

第一作者: 陈建平(1972-), 男, 山西保德人, 博士, 副教授, 主要从事地质工程、环境工程等方面的教学与科研工作。E-mail: chenjianp@tom.com

0 引言

采矿塌陷是常见的一种矿山地质灾害^[1],不仅改变地表原始地貌、破坏农田与植被,而且重构包气带岩土结构^[2],严重影响容重、含水率、孔隙度等重要土壤物理性质^[3-4]。塌陷裂缝是采矿塌陷的主要表现形式之一^[5],具有裂缝宽度大、深度大(甚至直达采空区)等不同于其他类型裂缝的特征^[6],严重破坏了土壤连续性,致使土壤这种近似于连续的均质介质变为非连续性介质。近年来国内学者围绕采煤塌陷裂缝对土壤水分的影响进行了深入的研究。杨泽元等^[7]通过建立陕北风沙滩地区包气带水分运移数学模型,定量分析了裂缝对土壤水分运移的影响程度。陈秋计等^[8]采用自主研发监测装置,通过室内试验对采煤塌陷裂缝重构区土壤水分特征进行了研究。马迎宾等^[9]研究得出采煤塌陷裂缝破坏降雨后坡面土壤水分分布格局,裂缝处与远离裂缝处土壤水分变化具有显著差异。

土壤水分扩散是非饱和带水分二维、三维运动重要研究对象,对土壤水分空间变异、水盐运移的研究至关重要。1956年 Bruce 等^[10]开创性地应用水平土柱法对土壤水分扩散率进行测定,研究成果得到了普遍的认可,成为土壤水分扩散率研究的主流方法。近年来在此方法基础上,分别开展了盐碱土^[11-12],沙土^[13-14],草甸沼泽土^[15]等不同类型的土壤的水分扩散的研究,主要是针对均质土壤,而采矿塌陷裂缝破坏了土壤的连续性,针对非连续均质土壤水分扩散率的研究则鲜有报道。

为分析土壤非连续性对水分扩散的影响,立足于非连续均质土壤,借鉴已有的研究成果,通过设置不同宽度的裂缝,模拟非连续均质土壤,进行室内物理试验,研究水分扩散规律。通过研究土壤水入渗情况,绘制含水率与土壤水分扩散率、Boltzmann 变化参数的关系曲线,分析出试验尺度裂缝对土壤水分扩散率的影响,可为采矿塌陷区复垦提供一定理论和生产实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样采自阜新市海州露天矿附近塌陷区,塌陷裂缝相互平行分布于塌陷区,最大宽度为 30 cm、最小宽度为 1 cm。剥离表层土后用环刀获取 0~20 cm 原状土样测定天然含水率与天然容重。取回的扰动土样需要经过风干、碾碎、过筛,剔除植物根须,采用筛分

法与密度计法进行颗粒分析,确定颗粒组成,判断土壤质地类型为砂质壤土(表 1)。

表 1 试验区土壤表层颗粒组成

Table 1 Particle constitution of soil surface layer in the experiment zone

样品 编号	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤 质地	天然含水率/天然容重/ (g·g ⁻¹) (g·cm ⁻³)
1	60.325	32.023	7.652	砂质壤土	0.052 1.44
2	65.882	30.319	3.799	砂质壤土	0.056 1.47
3	63.562	30.668	5.775	砂质壤土	0.054 1.48
平均值	63.256	31.003	5.741	砂质壤土	0.054 1.46

1.2 试验原理

采用水平土柱入渗试验,为降低重力对土壤水分运动的影响,填充土样高度较低(土样高 7.5 cm),水分在土柱中运动可忽略重力近似认为是一维水平流动^[16-17]。基本运动方程采用一维水平流动方程,定解条件为:

$$\begin{cases} \theta(x, t) = \theta_i & x > 0, t = 0 \\ \theta(x, t) = \theta_0 & x = 0, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x ——湿润峰扩散距离/cm;

t ——试验进行时间/min;

$\theta(x, t)$ —— t 时刻 x 位置处的土壤含水率/(g·g⁻¹);

θ_i ——初始含水率;

θ_0 ——接近于饱和含水率。

引入 Boltzmann 变换后,将偏微分方程化为常微分方程,用解析法求得土壤水分扩散率公式为:

$$D(\theta) = \frac{-1}{2\left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)} \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (2)$$

式中: $D(\theta)$ ——土壤水分扩散率/(cm²·min⁻¹);

λ ——Boltzmann 变化参数。

由于 Boltzmann 变化参数 λ 与含水率 θ 很难达成一个解析解,为方便计算采取将计算公式简化为差分方程的方式,即将 $\lambda \sim \theta$ 图近似为条状图,然后再进行计算:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} \sum_{\theta_0}^{\theta} \lambda \Delta\theta \quad (3)$$

1.3 试验设计与方法

试验采用有机玻璃制成的长 135 cm、宽 25 cm、高 50 cm 的长方形土柱(图 1)。土柱中心部分为长 105 cm 的试验槽,两侧设有长 10 cm、宽 25 cm、高 50 cm 的水槽,水槽与可调控高度的水箱相连接,试验时水箱可提供充足水源并控制水槽液面与土样高度平齐。

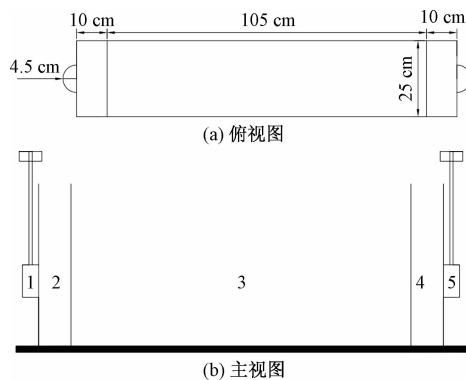


图1 试验装置示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of experiment device

注释:1与5为控制水箱,2与4为水槽,3为试验槽

为满足半无限长的试验几何尺寸要求,试验土柱填充厚度为 7.5 cm,设置 0.5 cm 厚度的垫层,长度为 105 cm^[18]。根据公式(1)的初始条件要求,按照原状土样测定的天然含水率、容重制备一定质量的土样,充分混合均匀后分五层装填入试验槽中,每层取制备土样质量的 1/5 填入土柱,并压实至 1.5 cm,每层土需进行刮毛处理,避免产生分层现象,确保填充土柱为均质土壤,满足物理相似的要求。自 2016 年 9 月 15 日至 11 月 6 日共进行八次对比试验,其中一次连续均质试验(对比试验),七次非连续均质(有裂缝)试验。在距进水端 20 cm 处设置裂缝,设计裂缝深度为 7.5 cm,根据已有研究与本试验塌陷区实地观测,塌陷裂缝宽度不等,跨度较大,研究区塌陷裂缝最宽处为 30 cm 左右,最窄部分近似于 1 cm,搭建模型时根据实地裂缝宽度与模型尺寸按照相似比 1:20 进行缩小,对于相对模型尺寸较大的裂缝,采用上宽下窄的楔形裂缝,裂缝设置见表 2。

表2 试验裂缝设置

Table 2 Setting of fissures in the experiment

	试验一	试验二	试验三	试验四	试验五	试验六	试验七
宽度/mm	0.5	1	上 下	上 下	上 下	上 下	上 下
			5 1	8 1.5	11 2	12 3	15 3.5
相似比	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20

为满足公式(1)的边界条件,试验采用侧向一端供水的方式,通过调节控制水箱确保水面与土样高度平齐,打开供水阀门向左侧水槽中迅速供水,供水端土壤含水率近似饱和状态。每五分钟观测并记录湿润峰的位置,待湿润锋前进到整个土柱的 3/4 附近时,停止供水,记录试验时间与湿润锋位置,从湿润峰处向进水端定间距取土样,采用烘干法测定不同位置土壤含

水率。

2 结果与讨论

2.1 裂缝对土壤水分扩散方式的影响

通过将试验时观测的不同时刻湿润峰值校正,绘制出不同裂缝情况下的土壤水分扩散湿润峰值与时间的关系图,由图 2 可知各湿润峰随试验时间变化的总体趋势相同,即试验开始时湿润峰前进速度较快,在裂缝处出现阻滞现象,通过裂缝后的湿润峰随着时间的推移扩散速率逐渐平稳。以 11 mm 裂缝试验湿润峰值图为例(图 2)。

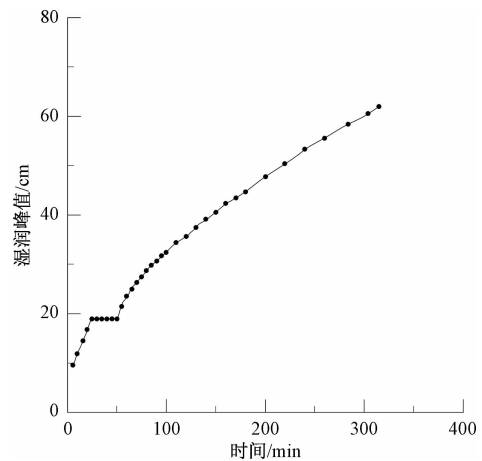


图2 11 mm 裂缝湿润峰值图

Fig.2 Wetting front value for fissure width with 11 mm

通过试验观测湿润峰,发现裂缝后土壤水分扩散方式与无裂缝扩散方式存在很大的差异,无裂缝情况下水分扩散湿润峰理想的锋面是上下一致平行推进,有裂缝试验中湿润峰面上下峰面出现显著不一致性,且裂缝宽度对湿润峰面不一致程度有明显影响,图 3 为 11 mm 裂缝土壤水分扩散情况。

图 3 可以清晰地发现裂缝的存在改变了土壤水分扩散的过程。在裂缝最底部先出现很窄的湿润峰,随着湿润峰的移动,底部湿润峰向前扩散的同时在垂向上也出现了扩散的现象。湿润峰通过裂缝之后,前期湿润峰向上扩散速率慢于向前扩散速率,当扩散时间足够长时,湿润峰不再向上扩散,形成与裂缝前相似的完整锋面,整体向前扩散。根据试验过程中湿润峰面出现的差异现象与试验过程中含水率的变化情况,基质势随含水率增大而降低的非线性关系,应用土壤水势能的基本理论^[18-19]分析得出:

(1)由于土壤水分扩散过程中垫层与裂缝后试验土层水分赋存情况的差异,产生了明显的土壤水势差,

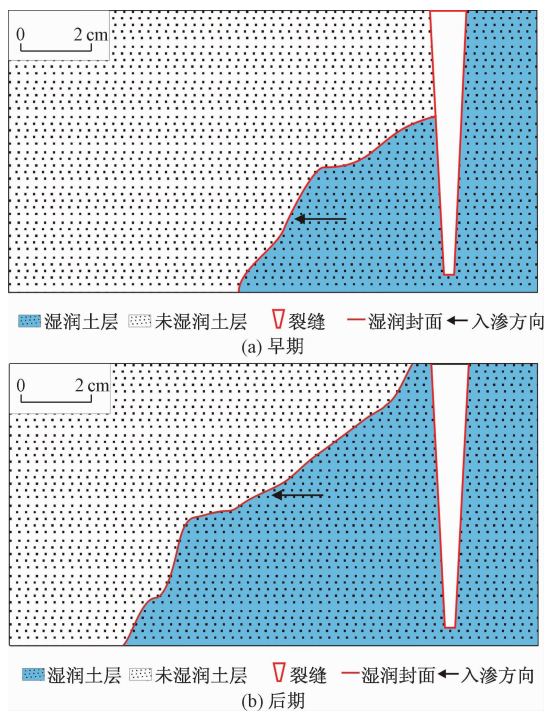


图 3 11 mm 裂缝处土壤水分扩散示意图
Fig.3 Diagrammatic sketch of soil water diffusion for fissure width with 11 mm

垫层中的水分会在这种水势差的作用下向上覆土层扩散。宏观上表现为初始时湿润峰上升速度快,随着时间的推移上升速度逐渐降低,从土壤水能态的角度分析,是因为初始水势能梯度较大,随着上覆土层含水率升高,基质势减小,扩散路径增长,水势能梯度降低,驱动土壤水分上升的能力减弱,产生湿润峰上升速度降低的现象。

(2)在土壤水分从底部向上覆土层扩散的同时,水平方向上的势能差开始出现,水平扩散产生。裂缝后土壤水分扩散开始呈现出上升的垂向扩散与水平扩散同时进行的二维扩散运动。

2.2 不同裂缝下 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线

根据试验结束时记录的入渗历时与各取土试样的位置,采用公式(4)计算 Boltzmann 变化参数 λ , λ 值取决于入渗时间与入渗位置,在一定程度上可以反映出水平方向上土壤水分扩散程度。绘制 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线(图 4), λ 值随着含水量的增大逐渐降低,在含水率较低时 λ 值变化缓慢,当含水率增大到一定程度时存在明显拐点, λ 值随含水率的增大急剧减小。

$$\lambda = x \cdot t^{-\frac{1}{2}} \tag{4}$$

采用 Origin8.0 对实测数据进行拟合,相关系数 $R^2 \geq 0.97$,所有试验数据均符合 Boltzmann 模型(公式

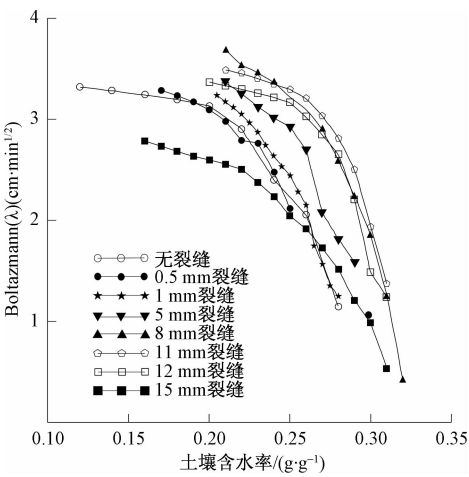


图 4 Boltzmann 变化参数 λ 与土壤含水率关系
Fig.4 Relation between Boltzmann variation parameter λ and soil water content

(5)),各试验模型参数如表 3 所示。

$$\lambda = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{\left(1 + \exp\left(\frac{(\theta - \theta_0)}{d_\theta}\right)\right)} \tag{5}$$

表 3 Boltzmann 变化参数 λ 拟合结果

Table 3 Fitting results of Boltzmann variation parameter λ

试验编号	拟合参数				R^2
	A_1	A_2	θ_0	d_θ	
无裂缝	3.402 91	-389.314 77	0.498 57	0.042 39	0.992 09
试验一	0.031 73	5.735 16	0.011 53	0.001 67	0.998 33
试验二	0.075 12	2.836 62	0.012 67	0.003 08	0.995 61
试验三	0.080 73	0.276 82	0.004 13	0.003 25	0.978 68
试验四	0.093 69	237 854.743 7	4.969 95	0.007 27	0.998 25
试验五	0.027 84	3.545 84	0.016 13	0.002 52	0.998 22
试验六	0.042 41	0.509 93	0.005 67	0.002 6	0.988 67
试验七	0.067 04	11.639 95	0.069 44	0.008 62	0.997 56

通过拟合结果与 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线可知裂缝对土壤水分扩散具有一定的影响(图 4)。在 0.5 mm 裂缝试验中,仅在含水率 $< 19\%$ 时, λ 值大于无裂缝试验,可以发现 0.5 mm 裂缝宽度在含水率较低时对土壤水分扩散具有影响。裂缝在 1 ~ 12 mm 时 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线在无裂缝时曲线的右上方,由于试验测得含水率区间主要在 21% ~ 31%, $\lambda \sim \theta$ 关系曲线缺失含水率较低的缓慢降低段,分析公式(4)可知:由于裂缝对扩散的阻滞作用,试验时间随着裂缝的增大而变长,公式(4)分母增大,而 λ 值相对于同含水率无裂缝时却显著增大,即相同含水率在有裂缝试验中的位置相对于无裂缝时距离供水端较远,有裂缝试验的湿润区土壤在较长的时间内供水端持续补给下含水率变化相对未湿润区较大,试验含水率区间较高。在裂缝为 15 mm 的试

验中, $\lambda \sim \theta$ 关系曲线相对其他试验曲线较为平缓, 含水率区间相对较大, 在含水率 $> 24\%$ 时 λ 值大于无裂缝, 表明含水率较大时相对无裂缝扩散较远, 而低含水率时扩散程度明显低于无裂缝试验, 根据试验现象与分析判断 15 mm 裂缝显著改变了扩散形式。

2.3 裂缝对扩散率的影响

按一定 θ 值分割 $\lambda \sim \theta$ 关系曲线成条形图, 根据公式(3)插值求解得出土壤水分扩散率与含水率实测关系曲线(图 5)。由图可知曲线变化趋势大体相同, 即在含水率较低的情况下水分扩散率较低, 增幅较小, 随

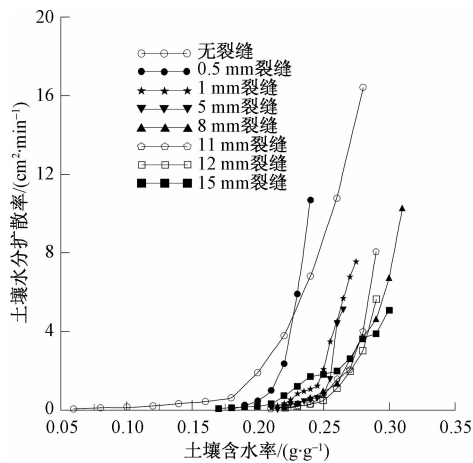


图 5 土壤水分扩散率与土壤含水率关系

Fig. 5 Relation between soil water diffusion rate and soil water content

着含水率的增加, 扩散率急剧升高。图 5 中曲线除试验一在含水率大于 23% 时, 测得扩散率大于无裂缝时扩散率外, 其它曲线都可以清晰的看出裂缝对土壤水分扩散率的影响, 即随着裂缝宽度的增加, 土壤水分扩散率逐渐降低。

以裂缝作为自变量, 采用 $\lg(x+1)$ 变换后的土壤水分扩散率作为因变量, 进行单因素方差分析, 如表 4 所示, $P < 0.0001$, 根据分析结果认为不同裂缝宽度对土壤水分扩散率有显著的影响。为进一步验证裂缝宽度对扩散率的影响, 以含水率为控制变量, 以裂缝宽度、土壤水分扩散率为自变量进行偏相关分析, 得出偏相关系数为 -0.442 , 呈显著负相关, 即随着裂缝的增大, 土壤水分扩散率逐渐减小。

表 4 单因素方差分析成果表

Table 4 Results of one-way variance analysis						
	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
组间	2.572	7	0.367	10.513	.000	显著
组内	0.979	28	0.035			
总数	3.551	35				

根据经验公式 $D(\theta) = ae^{b\theta}$ 拟合 $D(\theta) \sim \theta$ 曲线, 相关系数 $R_2 \geq 0.93$, 裂缝虽改变土壤水分扩散方式, 但仍满足指数函数变化趋势, 拟合结果如表 5 所示。结合统计分析与拟合结果, 根据不同裂缝下土壤水分扩散率与含水率的关系曲线, 将不同试验结果分成四种情况进行讨论。

表 5 土壤水分扩散率拟合参数

Table 5 Fitting parameters of soil moisture diffusivity

试验编号	无裂缝	试验一	试验二	试验三	试验四	试验五	试验六	试验七
拟合 <i>a</i>	0.016 6	3.97×10^{-7}	9.11×10^{-6}	4.46×10^{-11}	8.11×10^{-5}	8.25×10^{-8}	4.16×10^{-7}	0.005 2
参数 <i>b</i>	24.709 2	71.354 7	49.899 4	96.352 1	37.877 8	63.401 9	56.585 9	23.046 7
<i>R</i> ²	0.993 3	0.993 0	0.971 4	0.936 4	0.994 1	0.995 1	0.997 2	0.974 7

(1) 0.5 mm 裂缝时, 在含水率为 21% ~ 22%, 土壤水分扩散率相比无裂缝连续土壤水分扩散率降低了 71.1% ~ 37.6%, 即含水率较小时裂缝对扩散率存在影响, 这种影响随着含水率的增大逐渐减弱, 在含水率为 23% 时, 扩散率相比无裂缝时降低了 3.9%, 可近似认为 0.5 mm 裂缝在含水率大于 23% 时对土壤水分扩散几乎不产生的影响。

(2) 1 mm、5 mm 裂缝, 两次试验所得曲线趋势相同, 在含水率为 22% ~ 26% 时, 1 mm 裂缝试验水分扩散率相比无裂缝时降低了 91.4% ~ 50.1%, 而 5 mm 裂缝试验水分扩散率降低了 94.7% ~ 59.1%, 扩散率变化幅度相似, 在含水率较低时土壤水分扩散率明显

减小, 随着含水率的升高水分扩散率变化幅度逐渐降低, 但是仍具有明显降低的趋势。可以认为这种尺度的裂缝对土壤水分扩散率具有一定影响。

(3) 8 mm、11 mm、12 mm 裂缝, 在含水率为 22% ~ 27% 时, 8 mm 裂缝试验扩散率相比无裂缝时降低了 94.6% ~ 81.3%, 11 mm 裂缝试验水分扩散率降低了 96.5% ~ 84.8%, 12 mm 裂缝试验水分扩散率降低了 98.2% ~ 85.7%。由土壤水分扩散率降低幅度可知, 在含水率小于 25% 时, 降低幅度 $\geq 90\%$, 随着含水率增大, 降低幅度逐渐减小, 但仍保持较高变化, 由试验结果可以认为这种尺度下的裂缝对土壤水分扩散率具有显著影响, 且随着含水率的增大裂缝对扩散率的影

响有所下降,但仍保持较高的影响。

(4) 15 mm 裂缝严重影响了土壤水平扩散,在含水率为 22% ~ 27% 时,扩散率相比无裂缝时降低了 81.7% ~ 75.1%,降低幅度在 80% 左右波动,变化幅度明显不同于其他试验,通过试验现象与所得关系曲线认为 15 mm 裂缝改变了原始扩散方式。较大的裂缝明显阻滞了水分的扩散,当含水率较高时,裂缝后壁在扩散过程中充当了一个补给源,在水分达到一定程度时开始向含水率较低的土壤扩散,与此同时水槽的补给相对减少,可以将 15 mm 裂缝的试验看成两个补给源的扩散试验。当含水率较低时,没有足够的水源补充裂缝处水分,15 mm 裂缝可能会阻滞水分继续扩散,水平方向上土壤水变异加剧。

3 结论

通过控制裂缝的宽度进行室内试验,模拟塌陷型裂缝破坏的非连续均质土壤对水分扩散率的影响,根据试验现象与统计分析得出以下结论:

(1) 裂缝改变土壤水分扩散方式。裂缝阻滞土壤水分扩散,通过裂缝的湿润峰面出现明显不一致性,裂缝后土壤水分扩散方式变为上升的垂向扩散与水平扩散并存的二维扩散。

(2) 裂缝改变土壤水分扩散程度。裂缝延长入渗时间,在持续供水的条件下明显增高试验测得含水率区间,相同含水率的点裂缝试验入渗位置相对无裂缝较远,扩散程度较高。

(3) 裂缝改变土壤水分扩散率,土壤水分扩散率随裂缝的增大扩散率逐渐降低。0.5 mm 裂缝在含水率小于 23% 时土壤水分扩散率具有一定影响;1 ~ 12 mm 裂缝显著降低土壤水分扩散率,并随着裂缝的增大,扩散率逐渐减小;15 mm 裂缝明显阻滞土壤水分的扩散,水平扩散方式发生变化,甚至在含水率较低、无充足水源的情况下阻断水平扩散。

综上所述裂缝通过改变土壤的连续性影响土壤水分扩散的过程,改变了同一标高下土壤水分的分布情况,使土壤水分空间变异加剧,在干旱或半干旱地区甚至会造成植物枯萎,物种衰退,农作物绝收等严重危害,通过本次研究可以为今后塌陷区土地复垦与生态修复研究提供一定的研究基础。

参考文献:

- [1] 张和生,赵勤正,王智. 采矿引起的地质灾害及其对矿区生态环境的影响[J]. 太原理工大学学报,

2000,31(1):97-100.

ZHANG Hesheng, ZHAO Qinzhen, WANG Zhi. Mining affects on eco-environment of coal mining area [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000,31(1):97-100.

- [2] 张发旺,宋亚新,赵红梅,等. 神府—东胜矿区采煤塌陷对包气带结构的影响[J]. 现代地质,2009,23(1):178-182.

ZHANG Fawang, SONG Yaxin, ZHAO Hongmei, et al. The effect of coal-mining subsidence on aeration zone structure in the Shenfu-Dongsheng Mining Area [J]. Geoscience, 2009,23(1):178-182.

- [3] 陈朝,李妍均,邓南荣,等. 西南山区采煤塌陷对水田土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(18):276-285.

CHEN Zhao, LI Yanjun, DENG Nanrong, et al. Effect of coal mining subsidence on soil physical properties of rice field in mountain region of Southwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 276-285.

- [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.

XIE Yuangui, CHE Jiaxiang, SUN Wenbo, et al. Comparison study of mining subsidence years on soil physical properties of in mining areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(4):26-29.

- [5] 邵友峰,邓喀中,马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:25-53.

SHAO Youfeng, DENG Kazong, MA Weimin. Mining subsidence engineering [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003:25-53.

- [6] 聂振龙,张光辉,李金河. 采矿塌陷作用对地表生态环境的影响——以神木大柳塔矿区为研究区[J]. 勘察科学技术,1998(4):15-20.

NIE Zhenlong, ZHANG Guanghui, LI Jinhe. Influence of mining collapsing action on the surface ecological environment; Shenmu DaLiuTa Mine Area as the study area [J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology, 1998(4):15-20.

- [7] 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 Zeyuan, FAN Limin, XU Dengke, 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.
- [8] 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, 34(11): 308 - 310.
- CHEN Qiuji, WU Jinzhong, HOU Enke, et al. Research on moisture characteristic of reconstruction soil area of coal mining subsidence crack [J]. Coal Technology, 2015, 34(11): 308 - 310.
- [9] 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 collapse fissures caused by coal mining on soil moisture in slope lands after rain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 497 - 504.
- [10] Bruce RR, Klute A. The measurement of soil moisture diffusivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956(20): 458 - 462.
- [11] 郭全恩, 王益权, 马忠明, 等. 溶质类型与矿化度对土壤水分扩散率的影响 [J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 86 - 90.
- GUO Quanan, WANG Yiquan, MA Zhongming, et al. Effect of solute type and mineralizations on soil moisture diffusivity [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1): 86 - 90.
- [12] 宋新山, 何岩, 邓伟, 等. 松嫩平原盐碱土水分扩散率研究 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 210 - 213.
- SONG Xinshan, HE Yan, DENG Wei, et al. Study on saline - alkali soil moisture diffusivity in Songnen Plain [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(3): 210 - 213.
- [13] 古莱姆尔·艾尔肯, 虎胆·吐马尔白, 吴永涛. 不同粒径土壤水分扩散率测定 [J]. 新疆农业大学学报, 2015, 38(5): 426 - 430.
- Gulaimubaier · Aierken, Hudan · Tumarbay, WU Yongtao. Determination of water diffusivity of sandy loam soil with different particle [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2015, 38(5): 426 - 430.
- [14] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同生境土壤水分扩散率 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 867 - 873.
- YAO Shuxia, ZHAO Chuancheng, ZHANG Tonghui, et al. Soil moisture diffusivity in different habitats in Horqin Sand Land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 867 - 873.
- [15] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型草甸小叶章湿地土壤水分扩散率研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 152 - 156.
- SUN Zhigao, LIU Jingshuang. Soil water diffusivity in the typical meadow of calamagrostis angustifolia wetland in Sanjiang Plain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 152 - 156.
- [16] 邵爱军, 彭建萍. 非饱和带水分运动参数测定原理及方法——扩散度 $D(\theta)$ 的测定 [J]. 河北地质学院学报, 1997, 17(2): 186 - 191.
- SHAO Aijun, PENG Jianping. Principle and method of the determination of parameter for moisture flow in unsaturated zone: The determination of capillary diffusivity $D(\theta)$ [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1997, 17(2): 186 - 191.
- [17] 魏新平, 王文焰. 用水平土柱测定非饱和土壤水扩散率的瞬时剖面法 [J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 61 - 62.
- WEI Xinping, WANG Wenyan. Determination of water diffusivity in unsaturated soils using a horizontal soil column [J]. Water Resources and Hydropower engineering, 1999, 30(9): 61 - 62.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 231 - 236.
- LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil water dynamic [M]. Beijing: Tinghua University Press, 1988: 231 - 236.
- [19] 秦耀东. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 40 - 47.
- QIN Yaodong. Soil Physics [M]. Beijing: Higer Education Press, 2003: 40 - 47.