

DOI: 10.5846/stxb201705020800

杨永刚, 苏帅, 焦文涛. 煤矿复垦区土壤水动力学特性对下渗过程的影响. 生态学报, 2018, 38(16): - .

Yang Y G, Su S, Jiao W T. The influence of hydrodynamic characteristics on the infiltration process of soil water in a coal mine reclamation area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

煤矿复垦区土壤水动力学特性对下渗过程影响研究

杨永刚¹, 苏 帅², 焦文涛^{3,*}

1 山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006

2 山西大学 环境与资源学院, 太原 030006

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

摘要: 煤矿复垦区土壤水对植物生长、溶质运移以及土壤环境的变化起着至关重要的作用。定量揭示煤矿复垦区土壤水下渗过程是亟待诠释的关键科学问题。本研究通过测定典型矿区不同深度土壤非饱和导水率、容重、总孔隙度和粒径等水动力学参数, 结合染色示踪试验, 刻画矿区非饱和带土壤水运移过程。染色示踪结果显示 30、60 L 和 90 L 这 3 种实验下渗水量条件下, 水流沿 X 方向侧向扩散的最大距离分别为 10、30 cm 和 35 cm, 沿 Y 方向侧向扩散的最大距离分别为 10、25 cm 和 30 cm。互相关函数显示随着下渗水量增大, 水流扩散作用也在加强, 但过多水量并没有明显增加下渗深度和扩散距离。吸力大于 300 hpa 时, 0.01—0.05 mm 土壤粒径含量和非饱和导水率呈负相关关系; 吸力和非饱和导水率采用指数函数拟合效果较好 ($r^2 > 0.9$), 对拟合参数 a 、 b 和土壤容重 (x) 进行回归分析: $a = 0.0015x^2 - 0.00499x + 0.0004$, $b = 0.0583x^2 + 0.1234x - 0.072$ 。同一吸力下土壤容重大的土样非饱和导水率较小; 吸力值为 300 hpa 是非饱和导水率的转折点; 非饱和导水率和土壤容重呈现负相关关系, 和总孔隙度呈现正相关关系, 且二者的相关性随吸力的增加而降低。

关键词: 矿区; 非饱和导水率; 下渗过程; 土壤水

The influence of hydrodynamic characteristics on the infiltration process of soil water in a coal mine reclamation area

YANG Yonggang¹, SU Shuai², JIAO Wentao^{3,*}

1 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 College of Environment & Resource Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Soil water plays an important role in plant growth, solute transport, and soil environment changes. It is a key scientific problem to reveal the infiltration process of soil water in the unsaturated zone. This study used a typical mining area as the study area to investigate the unsaturated hydraulic conductivity, soil bulk density, porosity, and particle size in the different depths of soil layer by conducting a dye tracer experiment. This study aimed to elucidate the infiltration process of soil water and distribution characteristics in the unsaturated zone. The results showed that, at the experimental infiltration water of 30, 60, and 90 L, the greatest diffusion distance are 10, 30, and 35 cm, respectively, along the X direction and 10, 25, and 30 cm, respectively, along the Y direction. Soil water infiltration showed obvious heterogeneity and spatial variability. With more amount of water, it infiltration deeper and diffusion wider, and this was noted in a declining trend. When suction was greater than 300 hpa, the content of soil particle size between 0.01 and 0.05 mm was negatively correlated with unsaturated hydraulic conductivity. Unsaturated hydraulic conductivity decreased nonlinearly with increase in

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505702)

收稿日期: 2017-05-02; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wtjiao@cees.ac.cn

suction, suction and unsaturated hydraulic conductivity fitting with the exponential function ($r^2 > 0.9$), and regression analysis was performed for the parameters a , b , and soil bulk density (x) as follows: $a = 0.0015x^2 - 0.00499x + 0.0004$, $b = 0.0583x^2 + 0.1234x - 0.0726$. Under the same suction, bulk density of soil was greater, whereas unsaturated hydraulic conductivity was smaller. when the suction value is 300 hpa, the unsaturated hydraulic conductivity reaches a peak value. Unsaturated hydraulic conductivity was negatively correlated with bulk density, whereas positively correlated with total porosity, and the correlation rate decreased with increasing suction.

Key Words: mine area; unsaturated hydraulic conductivity; infiltration; soil water

土壤水对植物生长、溶质运移以及土壤环境的变化起着至关重要的作用^[1-3]。目前国内外学者从不同角度开展了土壤水方面的研究,主要集中在土壤水含量、水分利用效率、土壤水热动态、土壤水蚀、土壤水资源评价、土壤水盐分及其运移规律、土壤水量计算及水平衡研究、土壤水动力学及数值模拟研究等方面^[4-5]。方法涉及土壤水量平衡法、零通量面法、时域反射仪、示踪法、遥感法与数值模拟等方法^[6]。土壤水研究逐步从室内试验拓展到野外试验,由点到面,进而拓展到区域尺度,已经从静止、定性、经验走向动态、定量、机理^[7]。

土壤水在下渗过程中大多数情况下是在非饱和状态下进行的,非饱和导水率与土壤质地、土壤孔隙度和土壤紧实度关系密切^[8-9]。由于复垦区土壤结构复杂^[10],土壤水在下渗时并不是均匀下渗,水流在下渗土壤后会表现出明显的非均匀性和差异性,染色示踪可以清晰地反映水流在土壤中的空间分布特征和非均匀程度^[11-14]。目前对矿区非饱和带土壤水在垂直与水平方向上下渗过程认识还比较模糊。本研究以煤矿复垦区非饱和带土壤水为核心,基于不同深度土壤水动力学特性监测与染色试验,揭示土壤水下渗过程,阐明土壤水动力学特性对下渗过程的影响,为解决类似地区土壤水管理与遏制生态环境恶化等提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省古交市(图1),地处 $112^{\circ}03'30.3''$ — $112^{\circ}06'12.3''E$, $37^{\circ}56'35.00''$ — $37^{\circ}59'3.3''N$,属于温带大陆性气候,多年平均气温为 $9.6^{\circ}C$,多年平均降雨量为 426.1 mm ,多年平均蒸发量 2093.8 mm ,干旱指数为 2.2 ,地形以山地为主,山地丘陵面积占全区面积的 95.8% 。研究区最大的河流为汾河,支流有天池河、狮子河、屯兰河、原平河和大川河等,均为季节性河流。各类地下水发育齐全,基岩裂隙水分布于西部以及北部地区,碳酸盐岩类岩溶裂隙水和碎屑岩类裂隙孔隙水广泛富集于西山中部地区。研究区煤炭资源丰富且分布广泛,占研究区面积的 47.6% ,以能源、化工为主。采矿活动形成的酸性矿井废水、废气、粉尘等对矿区生态环境造成严重破坏,水土流失、植被破坏和土壤水污染等生态问题十分严重。

2 研究方法

在古交矿区东、西、南、北4个方向选择4个代表性样地,土壤样品深度分别为 0 — 10 、 30 — 40 、 60 — 80 、 100 — 120 cm 。采用环刀法测定土壤容重,比重瓶法测定土壤总孔隙度,采用6120指针式土壤紧实度仪测定土壤紧实度,Mastersizer 2000型激光粒度仪测定土壤粒径,采用Ku-pf非饱和导水率测量系统分别测定4个样地 0 — 10 、 30 — 40 、 60 — 80 、 100 — 120 cm 土层深度土样的非饱和导水率。

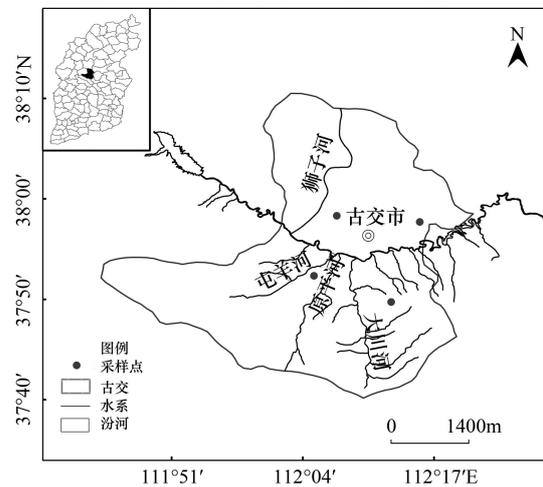


图1 研究区地理位置与样点分布图

Fig.1 Location of sample sites in the study area

在样地 1 做面积为 $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 、实验下渗水量分别为 30 L (试验 1)、60 L (试验 2) 和 90 L (试验 3) 染色示踪试验,此时染色试验区域内的初始入渗水头分别为 30、60、90 mm,严格控制各个试验距离在 5 m 以上。本试验采用亮蓝染色剂^[15],配制浓度为 $4.0\text{ kg}/\text{m}^3$ 。3 组试验矩形框平行放置,规定矩形框水平方向为 X 轴,与之垂直的方向为 Y 轴,染色剂下渗方向即为 Z 轴。试验开始前,将矩形框嵌入土壤 20 cm,露出地表 20 cm。在矩形框内注入分别为 30、60 L 和 90 L 的亮蓝染色剂。染色试验区域地表每 5 cm 等分,每个染色试验区域等分为 20 个观察剖面,每开挖一个剖面用数码相机照相记录土壤水流染色模式,图像解析度为 $1000\times 1000\text{ dpi}$,采用白色半透明树脂板对自然光进行散射^[16]。

3 结果与讨论

3.1 土壤水下渗过程

染色图像按照临界值方法转化为黑白二元信息图片^[17],计算染色面积随水流下渗深度分布特征。图 2 为 3 种实验下渗水量条件下 $Y=10\text{ cm}$ 剖面土壤染色面积随水流下渗深度的分布图,从图 2 可看出,随着矩形框内水量深度增加,土壤剖面最大染色深度和染色面积均有不同程度增加。土壤染色面积比例随土壤深度增加而减小,但染色面积比例并不是随土层深度增加而单调递减。当实验下渗水量为 30 L 时,土壤染色面积仅在表层较大;当实验下渗水量增加至 60 L 时,染色面积和最大下渗深度均有明显增加;当下渗水量增加至 90 L 时,染色面积和最大染色深度均有所增加,但增加幅度较小,这是因为煤矿复垦区 0—30 cm 处土壤容重较小,紧实度为 70 psi,而土层深度在 30—60 cm 处土壤容重比较大,土壤紧实度为 110 psi。

煤矿复垦区土壤水下渗过程中表现出明显的空间变异性和非均匀性,即最大染色深度上并没有完全染色,Hangen 在矿区复垦土壤染色试验也发现同样现象^[18]:

$$h_{Act}(x) = \sum_{i=1}^k \beta(x, z) \Delta h$$

式中, h_{Act} 为 x 位置的实际下渗深度, k 为 x 位置最大下渗深度上对应的像素数目。如果水流经过 (x, z) 位置,那么 β 为 1,反之为 0;由此计算出实际下渗深度。把每个染色剖面的实际下渗深度按照每 50 dpi 为一个区间,因此每个染色剖面可以划分为 20 个条带状矩形,计算并记录每个矩形的实际下渗深度。因此,每个染色试验区域被离散成 400 个底面积为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的棱柱体,近似认为每个条带上的深度就是此棱柱中心染色深度。

互相关函数从相关度为 1,间距为 0,经过一段距离后相关度变为 0 或到达一个平台值后发生逆转,此时这一距离代表水流侧向扩散的最大距离。计算每一染色试验区域 400 个棱柱体的实际下渗深度沿 X 方向和 Y 方向的相关度。下渗水量为 30、60 L 和 90 L,水流沿 X 和 Y 方向侧向扩散的最大距离见图 3。结果显示:当下渗水量为 30 L 时,水流沿 X 和 Y 方向侧向扩散不明显,此时以垂向下渗为主。当下渗水量 60 L 时,水流侧向扩散有明显增加,这是由于水流在下渗过程中,浅层土壤中孔隙已经被充满水,但是复垦区 30—60 cm 土层深度的土壤容重较大,土壤中允许水流下渗的孔隙减少,水流在下渗过程中未能向土壤深处继续传导,进而向水平方向区域扩散。当实验下渗水量增加至 90 L 时,水流侧向扩散作用有所增加,但增加幅度并不明显,这是由于水流下渗过程中使表层土壤饱和度进一步增加,水流下渗均匀程度提高,进而侧向扩散作用减弱,这一点与盛丰等人的研究结果一致^[19]。下渗水量分别为 30、60、90 L 这 3 种条件下,水流沿 X 方向侧向扩散的最大距离分别为 10、30 cm 和 35 cm,沿 Y 方向侧向扩散的最大距离分别为 10、25 cm 和 30 cm。

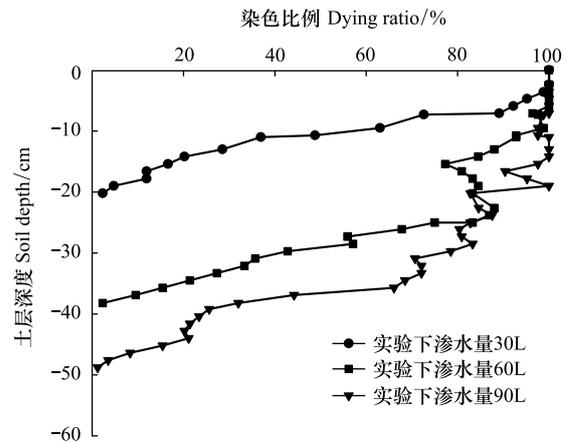


图 2 不同实验下渗水量条件下土壤水染色剖面图

Fig. 2 Soil water staining profile under different experiment infiltration water

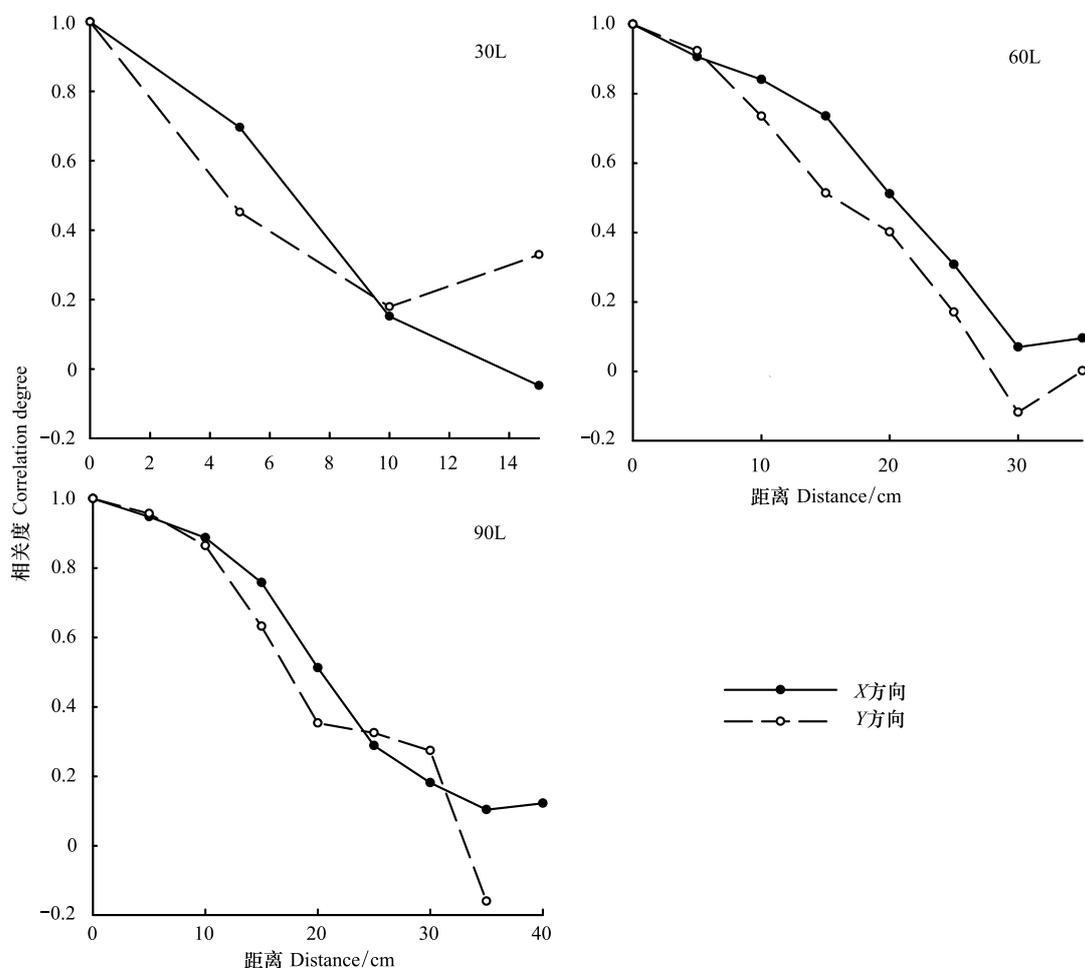


图3 不同下渗水量条件下互相关函数分析

Fig.3 Analysis of cross correlation function under different infiltration water

3.2 土壤水动力学特性对下渗过程的影响

煤矿复垦区土壤类型为粉质壤土,土壤容重均介于 $1.32\text{--}1.62\text{ g/cm}^3$ 。土壤容重随着土层深度的增加呈现先上升然后下降的趋势,土壤总孔隙度垂直变化规律与土壤容重变化规律相反,煤矿复垦区土壤性质见表1。

采用 Ku-pf 非饱和导水率测量系统分别测定煤矿复垦区4个样地0—10、30—40、60—80、100—120 cm 土层的非饱和导水率,各样地不同土层深度非饱和导水率见图4。

指数函数 $K(\psi) = a \times \exp(b \times \psi)$ 对吸力和非饱和导水率进行拟合,其中 a 、 b 为拟参数(表2)。当 $\psi = 0$ 时, a 为饱和导水率。对4个样地土壤容重(x)和指数函数中的拟合参数 a 、 b 进行回归分析,得到多项式关系式: $a = 0.0015x^2 - 0.00499x + 0.0004$, $b = 0.0583x^2 + 0.1234x - 0.0726$ 。

分别对吸力值为25、70、150、300、500、750、1000 hpa 时做非饱和导水率值和土壤容重、总孔隙度、0.01—0.05 mm 粒径含量相关性分析。由图5可知,吸力值为25、70、150、300 hpa 时的非饱和导水率值和容重呈现极显著负相关关系,吸力值为500、750 hpa 和1000 hpa 时的非饱和导水率值和容重呈现显著负相关关系。吸力值为25、70、150 hpa 时的非饱和导水率值和总孔隙度呈现极显著性正相关关系,吸力值为300 hpa 时的非饱和导水率值和总孔隙度呈现显著性正相关关系。当吸力大于300 hpa 时二者未能通过显著性检验,且随着吸力的增大土壤容重、总孔隙度和非饱和导水率值的相关性都在降低。0.01—0.05 mm 粒径含量和300、500、750 hpa 和1000 hpa 时的非饱和导水率呈显著性负相关关系。

表 1 煤矿复垦区土壤性质

Table 1 Soil properties in coal mine reclamation area

样地 Sample plot	采样深度/cm Sampling depth	容重/(g/cm ³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	黏粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sandy	土壤类型 Soil type	0.01—0.05mm 粒径含量 0.01—0.05mm Particle size content
1	0—10	1.35	49.47	3.8	50.62	45.58	粉质壤土	49.94
	30—40	1.62	40.63	3.47	52.41	44.12		46.41
	60—80	1.51	44.35	3.66	52.9	43.39		48.44
	100—120	1.45	46.19	3.54	54.69	41.75		51
2	0—10	1.34	47.81	1.47	53.95	44.59	粉质壤土	37.91
	30—40	1.55	42.93	3.16	50.03	46.82		49.93
	60—80	1.48	45.21	3.04	46.01	50.86		45.73
	100—120	1.44	46.53	2.69	46.13	51.18		54.15
3	0—10	1.34	47.79	5.12	57.65	37.22	粉质壤土	46.83
	30—40	1.57	42.2	2.75	46.95	50.27		55.22
	60—80	1.47	45.39	3.17	49.07	47.73		49.18
	100—120	1.38	48.5	3.19	51.44	45.36		51.76
4	0—10	1.32	50.32	2.16	50.52	47.35	粉质壤土	55.01
	30—40	1.59	41.43	2.52	53.86	43.64		56.67
	60—80	1.46	45.67	2.16	48.71	49.12		54.8
	100—120	1.36	49.1	1.76	53.6	44.43		49.2

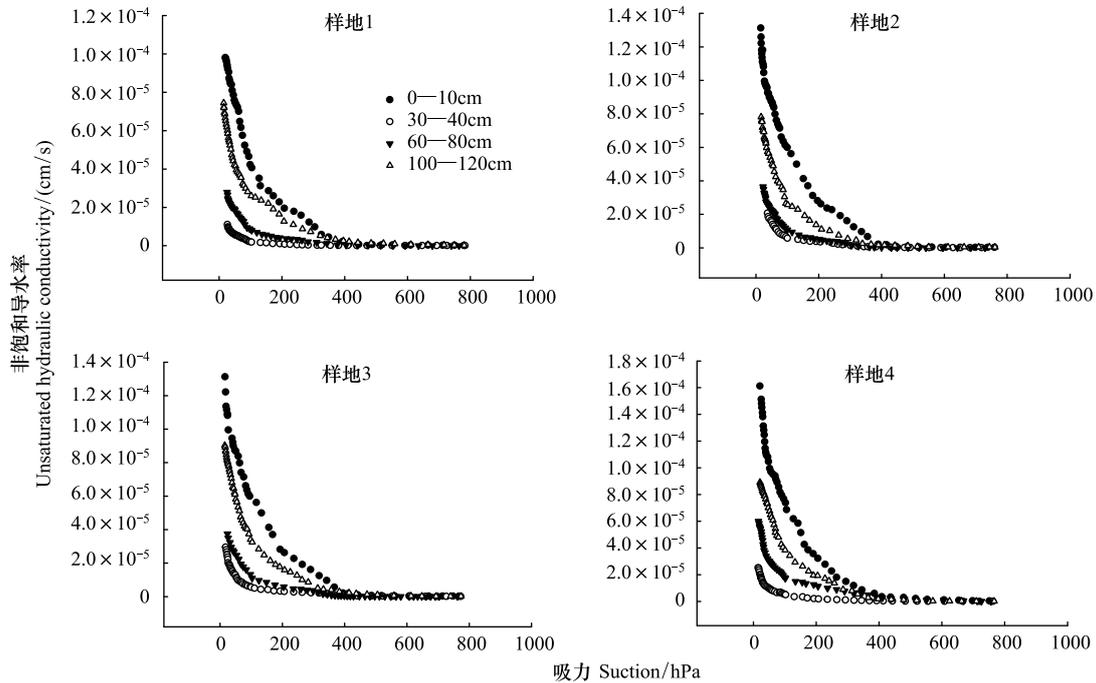


图 4 煤矿复垦区不同土层深度非饱和和导水率

Fig.4 Unsaturated hydraulic conductivity at different soil depth in coal mine reclamation area

结合图 4 和图 5 可看出,相同吸力下,煤矿复垦区土壤容重大的土壤非饱和和导水率较小,土壤非饱和和导水率和土壤吸力之间呈现非线性指数关系,并且随着吸力增大呈现快速下降和缓慢下降的过程。随着吸力增加,土壤中大孔隙和中等孔隙首先开始排水含水率迅速降低,当吸力为 300 hpa 时为非饱和和导水率变化的转折点,即吸力小于该值时非饱和和导水率变化剧烈下降速度较快。随着土壤吸力继续增大,土壤含水量已经较少,水分主要存在于中小孔隙中,土壤连通性降低,实际过水面积减小,非饱和和导水率变化范围也减小。

表 2 煤矿复垦区土壤非饱和和导水率参数拟合结果

Table 2 Parameters of unsaturated hydraulic conductivity of different soil depth in coal mine reclamation area

样地 Sample plot	土层深度/cm Soil depth	a	b	R^2	样地 Sample plot	土层深度/cm Soil depth	a	b	R^2
1	0—10	0.000121	-0.009773	0.98	2	0—10	0.000133	-0.008215	0.96
	30—40	2.31×10^{-5}	-0.020024	0.97		30—40	4.57×10^{-5}	-0.019733	0.98
	60—80	5.53×10^{-5}	-0.018168	0.95		60—80	5.78×10^{-5}	-0.01674	0.96
	100—120	8.51×10^{-5}	-0.013222	0.96		100—120	8.95×10^{-5}	-0.011132	0.97
3	0—10	0.000133	-0.008057	0.97	4	0—10	0.000211	-0.014509	0.95
	30—40	4.07×10^{-5}	-0.023263	0.97		30—40	3.86×10^{-5}	-0.025831	0.96
	60—80	5.57×10^{-5}	-0.013669	0.94		60—80	7.74×10^{-5}	-0.020328	0.97
	100—120	0.000103	-0.01063	0.95		100—120	0.000131	-0.014733	0.97

样地 1 和样地 2 植被恢复类型为“林地+草地”,样地 3 植被恢复类型为“灌丛+草地”,样地 4 植被恢复类型为“草地”

Rezanezhad 对泥炭土的研究发现由于土壤孔隙被气体填充及自身的不规则性,导致土壤连通性降低进而导致非饱和导水率减小^[20]。随着土壤吸力增大,0.01—0.05 mm 粗粉粒级含量对吸非饱和导水率时影响较为明显,这是因为 0.01—0.05 mm 粒级是构成土壤中孔隙的主要部分,土壤中微小孔隙及颗粒对水分吸附力和摩擦力起主要作用,水流在孔隙中流动阻力变大水分不容易通过。当吸力继续增加时,此时水分主要存于土壤中不连通的孔隙中,此时土壤中水分紧紧吸附在土壤颗粒表面,单位吸力梯度下导水率变化范围更小。

4 结论

煤矿复垦区土壤水下渗后表现出明显的非均匀性和空间变异性,实验下渗水量增大会增加土壤水下渗深度,随着实验下渗水量增多,水流扩散作用也在加强,但过多水量并没有明显增加下渗深度和扩散距离。非饱和导水率随吸力增大呈非线性减小;同一吸力下,复垦区土壤容重大的土层非饱和导水率较小。复垦区土壤非饱和导水率和土壤容重呈现负相关关系,和总孔隙度呈现正相关关系,且二者的相关性随吸力的增加降低。

参考文献 (References):

- [1] Sturzaker R, Mbakwe I, Mziray N R. A soil water and solute learning system for small-scale irrigators in Africa. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33(5): 788-803.
- [2] 杨永刚, 李国琴, 焦文涛, 黄磊. 黄土高原丘陵沟壑区包气带土壤水运移过程. *水科学进展*, 2016, 27(4): 529-534.
- [3] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 常春艳, 姜曙千, 贾吉超, 李晋. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征. *生态学报*, 2016, 36(4): 1040-1049.
- [4] 校亮, 熊东红, 张宝军, 张素, 吴汉, 杨丹, 李建查, 史亮涛. 葛藤覆盖下干热河谷冲沟沟岸土壤水热变化特征. *生态学报*, 2018(2): 1-12.
- [5] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征. *生态学报*, 2014, 34(8): 1975-1983.
- [6] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [7] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988: 220-263.

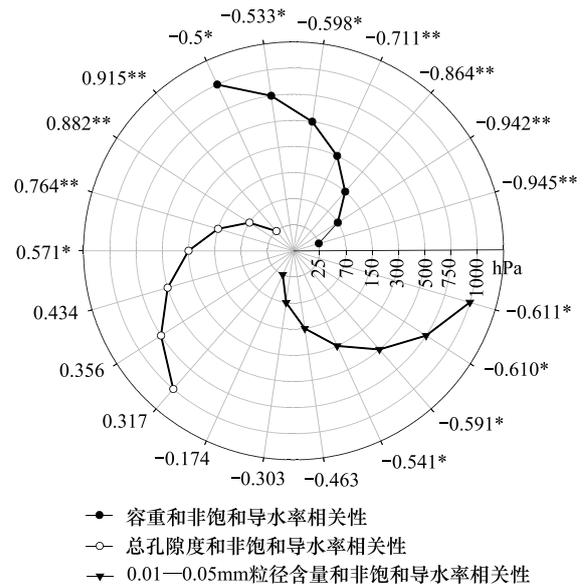


图 5 土壤特性对下渗过程影响

Fig.5 Effect of soil properties on infiltration process

- [8] 廖凯华, 徐绍辉, 吴吉春, 朱青. 不同土壤转换函数预测砂土非饱和导水率的对比分析. 水科学进展, 2013, 24(4): 560-567.
- [9] 马美红, 张书函, 王会肖, 杨会彩, 李青. 非饱和土壤水分运动参数的确定——以昆明红壤土为例. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 38-42.
- [10] Zhen Q, Ma W M, Li M M, He H H, Zhang X C, Wang Y. Effects of vegetation and physicochemical properties on solute transport in reclaimed soil at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2015, 133(3): 403-411.
- [11] Kodesova R, Nemecek K, Kodes V, Fer M, Jirku V, Nikodem A, Zigova A, Jaksik O, Kocarek M. Using the dye tracer for visualization of preferential flow in macro and micro-scale. *Vadose Zone Journal*, 2011, 11(1): 59-75.
- [12] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究. 土壤学报, 2013, 50(5): 871-880.
- [13] 张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 韩旖旎, 杜晓晴, 陈上杰. 森林生态系统林木根系对优先流的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.
- [14] Kodešová R, Němeček K, Žigová A, Nikodem A, Fér M. Using dye tracer for visualizing roots impact on soil structure and soil porous system. *Biologia*, 2015, 70(11): 1439-1443.
- [15] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137-153.
- [16] Forrer I, Papritz A, Kasteel R, Flühler H, Luca D. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 313-322.
- [17] 吴庆华. 基于土壤水入渗补给的优先流定量研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013: 17-23.
- [18] Hangen E, Gerke H H, Schaaf W, Hüttl R F. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine - starch staining. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 121-135.
- [19] 盛丰, 王康, 张仁铎, 李萼. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究. 水利学报, 2009, 40(1): 101-108.
- [20] Rezanezhad F, Quinton W L, Price J S, Elliot T R, Elrick D, Shook K R. Influence of pore size and geometry on peat unsaturated hydraulic conductivity computed from 3D computed tomography image analysis. *Hydrological Processes*, 2010, 24(21): 2983-2994.