

多因素作用下浑水入渗对土壤导水特性的影响

康守旋¹, 费良军^{1*}, 钟 韵², 赵彭辉¹, 杨 震¹, 樊倩雯¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘 要: 浑水入渗具有复杂的上边界变化过程, 其上边界导水能力的变化规律是研究浑水入渗特性的重要基础。为研究浑水入渗形成致密层过程中导水率的变化情况, 该研究进行了 17 组 (9 组正交试验处理, 8 组用于模型验证) 浑水饱和土柱入渗试验, 通过对试验结果进行多元回归构建多因素 (浑水含沙率、黏粒含量及入渗时间) 影响下砂土导水率动态模型; 并结合浑水饱和土柱入渗特性进行合理假设, 分别建立浑水砂壤土和粉壤土饱和土柱导水率动态模型并进行验证。结果表明: 浑水含沙率、黏粒含量及入渗时间对砂土导水率影响极显著 ($P < 0.01$), 入渗时间为砂土影响导水率变化的主要因素, 其次为含沙率和黏粒含量; 建立的砂土导水率动态模型决定系数为 0.853, 均方根误差为 0.004 cm/min, 表明该模型可客观反映各因素与导水率之间的关系; 模型验证试验结果中均方根误差小于 0.01 cm/min, 相对误差绝对值均值小于 7%, 说明该导水率动态模型可靠性较高; 砂壤土和粉壤土导水率动态模型决定系数分别为 0.912 和 0.930, 均方根误差分别为 2×10^{-3} 和 5×10^{-5} cm/min; 模型验证中均方根误差小于 0.01 cm/min, 相对误差绝对值小于 17%, 表明模型计算值与实测值的一致性较好。研究结果有助于揭示浑水入渗规律, 为进一步探明浑水入渗过程及致密层阻渗机理提供理论依据。

关键词: 入渗; 土壤; 模型; 浑水; 导水率; 多因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212159

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0083-08

康守旋, 费良军, 钟韵, 等. 多因素作用下浑水入渗对土壤导水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 83-90.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212159 <http://www.tcsae.org>

KANG Shouxuan, FEI Liangjun, ZHONG Yun, et al. Effects of muddy water infiltration on the hydraulic conductivity of soils by multiple factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 83-90. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212159 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国黄河流域大部分区域降水稀少^[1-2], 农业灌溉用水严重不足^[3-4], 制约了当地农业发展。该区域降雨分布集中, 水土流失严重^[5], 使得黄河成为世界上含沙率最高的河流^[6]。为充分利用水资源来满足农业灌溉用水的需求, 该地区的一些灌区大力开展引浑灌溉。浑水灌溉可以在提高水资源利用率的同时改良土壤、增加土壤肥力。进入农田的浑水入渗时, 部分泥沙颗粒随水分运移进入土壤中, 滞留在土层内, 形成滞留层, 而浑水中大部分泥沙颗粒逐渐沉积在土壤表面, 形成沉积层。滞留层和沉积层共同形成了结构不同于原土的致密层^[7-9], 从而改变了上边界入渗条件, 对入渗过程产生影响。因此, 深入研究浑水入渗过程对缓解引浑灌区水资源紧缺、扩灌增产和提高灌溉质量等具有重要的理论价值和现实意义。

浑水灌溉是引用含沙河水作为水源进行灌溉。浑水

在进入田间后, 其所含的泥沙随水流推进、沉降, 在土体表面产生致密层, 形成了不同于清水的土壤水分入渗规律^[10-11]。一些研究采用浑水试验方法探索浑水入渗规律及影响因素^[12-13], 发现: 累积入渗量与入渗时间呈幂函数变化关系^[12]; 浑水含沙率、泥沙颗粒级配、土壤容重及土壤初始含水率等均能影响浑水入渗^[14-16]; 入渗率和湿润锋运移距离随浑水含沙率的增大而减小^[16]; 泥沙中小于 0.01 mm 颗粒含量越大, 阻渗作用越显著^[17]; 浑水入渗能力和湿润锋运移距离均随土壤容重的增大而减小^[18]。也有研究分析了膜孔灌溉下的浑水入渗规律^[19-21]: LIU 等^[22-23]研究了不同浑水肥液浓度和初始含水率下浑水膜孔灌的累积入渗量变化规律、水分分布和再分布及氮素分布规律; 姜瑞瑞等^[24]研究了不同膜孔直径下多向交汇浑水入渗湿润体特征及灌水均匀度。另外的研究关注了浑水入渗模型, 如引入遗传算法拟合带有经验值的 Kostikov 模型^[17]、将浑水入渗形成致密层的阻渗作用归结为湿润锋平均吸力值的 Green-Ampt 模型^[25]、利用浑水波涌灌大田试验数据并结合 Kostikov 模型推导了 3 种经验模型^[26]。除农业领域外, 浑水入渗在环境、工程方面也得到广泛关注^[27-31]。

浑水入渗过程中, 所形成致密层阻碍了水分入渗, 减小了入渗量。随着浑水入渗量的减小, 浑水中形成致密层的泥沙量也将变少, 使得致密层厚度增加速率变缓, 土壤入渗能力不至于急速减小。因此, 浑水入渗过程是

收稿日期: 2022-12-22 修订日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52079105、51779205); 西安理工大学博士学位论文创新基金 (310-252072107)

作者简介: 康守旋, 博士生, 研究方向为节水灌溉。

Email: kangsx2824@163.com。

*通信作者: 费良军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉与农业水资源利用。Email: feiliangjun2008@163.com。

入渗量变化与致密层阻渗能力相互影响的过程^[18-19]。除入渗量外,致密层导水能力与其内部孔隙大小、结构有关^[32-33],即形成致密层的浑水泥沙数量及粒径(含沙率及泥沙颗粒级配)对致密层导水能力造成影响。通常采用土柱来确定土壤的导水能力^[34],为了便于研究入渗过程,减少不可控因素,已有研究采用饱和土柱进行浑水渗流试验,来探索该状况下导水能力的变化规律^[8]。利用数值模拟方法来探索土壤入渗特性已成为研究热点,如介飞龙等^[35]采用椭圆方程来模拟膜孔灌湿润锋形状,研究了初始含水率对膜孔灌湿润锋特征的影响;冯正江等^[36]在使用小波分析和通径分析法分析 Kostiakov 模型标定因子和土壤特性参数的基础上,利用多元线性回归、BP 神经网络和支持向量机建立估算标定因子的土壤传递函数;王晓彤等^[37]利用 Hydrus-1D 软件来模拟分析黄河泥沙充填复垦土壤的入渗和蒸发特性,优化了复垦土壤的夹层结构,为研究设计黄河泥沙夹层式土壤剖面提供了一种可靠方法。

目前,现有研究多集中在浑水入渗特性、影响因素及入渗模型等方面,缺乏浑水入渗致密层形成过程对导水能力影响的研究。在致密层形成过程中,水分入渗上

边界条件不断变化,土壤的导水能力也随之改变。研究致密层在土体表面形成后,不同因素下导水能力变化规律对揭示浑水入渗机理具有十分重要的意义。因此,为了探究浑水入渗对土壤导水能力的影响,本文进行饱和土柱浑水渗流试验,深入分析多因素(含沙率、泥沙颗粒级配、入渗时间)对致密层形成条件下土体导水能力的影响,建立多因素导水率动态模型,为进一步揭示浑水入渗规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样采自引黄灌区 0~30 cm 深度范围的农田土壤,采样地点分别为西安市灞桥区、西安北郊及宁夏吴忠市。土壤样品自然粉干碾碎后,过 2 mm 筛以备使用。土壤粒径采用 Mastersizers-2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文仪器公司,测量范围为 0.02~2 000 μm)测定,结果如表 1 所示。按照国际制土壤质地分类标准,采自西安灞桥、西安北郊、宁夏吴忠的土样分别为粉壤土、砂壤土及砂土。

表 1 试验土壤和泥沙粒径组成
Table 1 Particle size composition of tested soils and sediments

材料 Materials	序号 No	颗粒组成 Particle composition/%			质地 Texture	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/(g·cm ³)
		<0.002 mm	0.002~<0.02 mm	0.02~2 mm			
土壤 Soil	S1	9.46	53.66	36.88	粉壤土	7.24	1.35
	S2	4.87	21.21	73.92	砂壤土	9.57	1.45
	S3	1.04	6.50	92.46	砂土	11.86	1.76
浑水泥沙 Sediment in muddy water	J1 (低黏粒含量)	1.01	8.86	90.13			
	J2 (中黏粒含量)	2.60	28.06	69.34			
	J3 (高黏粒含量)	4.22	42.14	53.64			
	Y1	4.41	44.67	50.92			
	Y2	1.59	20.25	78.16			

入渗试验浑水中所含泥沙取自泾惠渠灌区干渠,取回的泥沙经风干过 1 mm 筛,人工配置出不同颗粒组成的 5 种泥沙,其中 3 种不同级配用于多因素试验,按照黏粒含量大小分别记为 J1 (低黏粒含量)、J2 (中黏粒含量)及 J3 (高黏粒含量),剩余 2 种 (Y1 和 Y2) 用于验证试验。

1.2 试验设计

开展多因素试验研究浑水含沙率 (3%、6%、9%) 和浑水泥沙种类 (J1、J2、J3) 对砂土饱和土柱入渗的影响并建立入渗模型。各组试验各进行 3 次重复。为了验证多因素浑水入渗模型的可行性,另外设置了 8 组试验。共计 17 组试验,具体方案如表 2 所示。

1.3 试验过程

浑水配置:按照试验设计选取泥沙种类,并依据含沙率称量相应质量的泥沙和去离子水,将其倒入马氏瓶后充分搅拌以配置浑水。

试验装置准备:2022 年 5 月在西安理工大学农水试验大厅进行试验。浑水饱和土柱入渗装置由土柱和浑水马氏瓶两部分组成,如图 1 所示。土柱材质为有机玻璃,内径为 5 cm、高为 13 cm,为了通气和更好收集土柱渗出的水流,底部装有开孔的垫片,并在土柱底盖加有管

嘴。试验前,按预定容重分层填装土壤,层间刮毛,装土高度为 8 cm。为防止土壤从底部小孔中损失,装土前在底部垫入滤纸。将装好的土柱在水中浸泡 12 h,使其饱和后进行饱和土柱浑水入渗试验。

表 2 浑水入渗试验方案

Table 2 Experimental scheme of muddy water infiltration				
处理 Treatment	土质 Soil texture	含沙率 Sand content/%	泥沙种类 Types of sediment	备注 Remarks
1	砂土	3	J1	用于建立模型
2		6	J1	
3		9	J1	
4		3	J2	
5		6	J2	
6		9	J2	
7		3	J3	
8		6	J3	
9		9	J3	
10	砂土	4	Y1	用于模型验证
11	砂土	8	Y2	
12	砂壤土	6	J3	
13	砂壤土	3	J3	
14	砂壤土	9	J3	
15	粉壤土	6	J1	
16	粉壤土	3	J1	
17	粉壤土	9	J1	

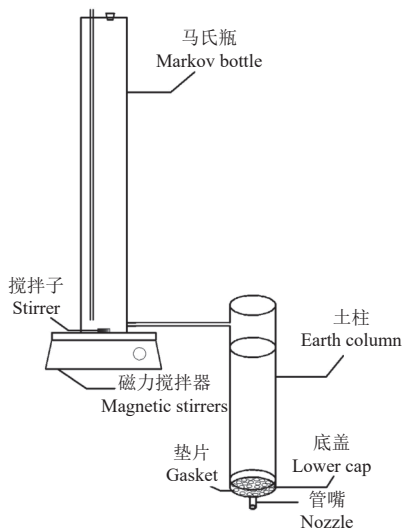


图 1 试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

试验过程：为保持稳定的浑水含沙率，将马氏瓶与磁力搅拌器结合组成浑水马氏瓶进行入渗。将带有磁性的搅拌子放入装有浑水的马氏瓶中，再将马氏瓶放置于磁力搅拌器上，利用磁场力使浑水马氏瓶内的搅拌子进行旋转来不断搅拌浑水，保持浑水含沙率的稳定。浑水入渗前，为排除初始渗流速度的影响，先进行清水入渗，待入渗稳定后，再进行浑水渗流。在管嘴下放置量筒，按照先密后疏的时间间隔量取渗出水的体积并记录，以计算出不同时间的导水率。根据 Darcy 定律^[38]，流量与水力梯度成正比，即：

$$q = K_h i A \tag{1}$$

式中 q 为渗透流量， cm^3/min ； K_h 为导水率， cm/min ； i 为水力梯度； A 为土样的横截面积， cm^2 。

当浑水入渗时，饱和土柱上界面会发生变化：部分泥沙颗粒随水分运移进入土壤中，滞留在土层内，而浑水中大部分泥沙颗粒逐渐沉积在土壤表面改变了土壤导水性能，使得导水率不断发生变化而无法准确获得，这里使用一段时间间隔的平均出流量来代替渗透流量，再利用式（1）计算得出不同入渗时刻的土柱导水率值。平均出流量与导水率存在以下关系为^[8]

$$\frac{Q(t+\Delta t) - Q(t)}{\Delta t} = q \tag{2}$$

式中 $Q(t+\Delta t)$ 为一段时间间隔后出流量， cm^3 ； $Q(t)$ 为时间间隔前出流量； Δt 为时间间隔， min ；二者比值为一段时间间隔平均出流量，近似为渗透流量。

1.4 评价指标

为评价模型准确性，利用统计学中决定系数（ R^2 ），均方根误差（ S_{RMSE} ）和相对误差绝对值均值（ S_{MARE} ）对模型中计算值与试验实测值之间的符合度进行评价分析。通常 R^2 越接近于 1， S_{RMSE} 和 S_{MARE} 越接近 0，表明模型计算精度越高，即实测值与计算值越接近。

2 结果与分析

2.1 多因素影响下导水率动态变化

根据不同处理浑水饱和土柱入渗试验，得到每组试

验的导水率值随入渗时间的变化过程（图 2）。由图 2 可以看出，导水率随入渗的进行不断减小，在同一入渗时刻，各组试验累积入渗量存在差异，表明各因素对导水率影响程度不同。

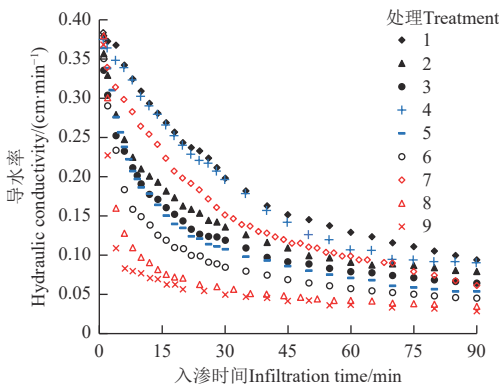


图 2 不同试验处理导水率随时间变化

Fig.2 Hydraulic conductivity versus time for different treatments

为进一步分析各因素对饱和土柱入渗下导水率的影响，采用多因素方差分析方法分析浑水含沙率与黏粒含量（体积分数）对导水率的影响，结果见表 3。由表 3 可知，浑水含沙率、各颗粒含量和入渗时间对导水率影响极显著（ $P<0.01$ ）。

表 3 不同因素不同水平对导水率的影响

Table 3 Effects of different factors and different levels of hydraulic conductivity

因素 Factors	F 值 Value of F
含沙率 Sand content(S)	21.912**
入渗时间 Infiltration time(t)	41.407**
黏粒含量 Clay particles content(N)	7.528**
S×t	9.976**
S×N	0.534
N×t	6.838**

注：**表示极显著（ $P<0.01$ ），*表示显著（ $P<0.05$ ）。
Note: ** mean extremely significant ($P<0.01$) and * mean significant($P<0.05$).

采用多元回归法^[39-40]构造浑水含沙率和 $<0.002\text{ mm}$ 颗粒（黏粒）含量影响下导水率的动态经验计算式：

$$K_h = aS^bN^c t^d \tag{3}$$

式中 S 为浑水含沙率，%； N 为黏粒含量 %； a 为导水能力系数； b 、 c 、 d 分别为各项因素的指数。

多元回归分析结果如式（4）所示， R^2 为 0.853， S_{RMSE} 为 0.004 cm/min ，模型拟合效果良好。

$$K_h = 1.606S^{-0.590}N^{-0.293}t^{-0.439} \tag{4}$$

所求经验模型（式（4））中包含 3 个影响因素，不同因素之间单位和数量级存在差异，为分析各因素对导水率影响的重要程度，对数据进行标准化处理，处理后 b 、 c 、 d 的标准系数分别为 -0.422 、 -0.295 和 -0.789 ，表明浑水含沙率、黏粒含量和入渗时间对单位膜孔面积累积入渗量均有影响，其中受入渗时间影响最大，浑水含沙率次之，黏粒含量影响最小；标准系数均小于 0，表

明导水率随入渗时间、浑水含沙率和黏粒含量间增大而减小。

为检验式(4)的可靠性,利用试验处理10、11对其进行验证,将试验实测值和模型计算值进行对比分析,结果见图3。图3中模型(式(4))和实测值间 S_{MARE} 分别为6.99%和5.93% (小于7%), S_{RMSE} 分别为0.008和0.006 cm/min (处理10和11),总体误差较小(小于0.01 cm/min),说明所建的动态模型能有效地描述导水率与各因素及入渗时间的量化关系。

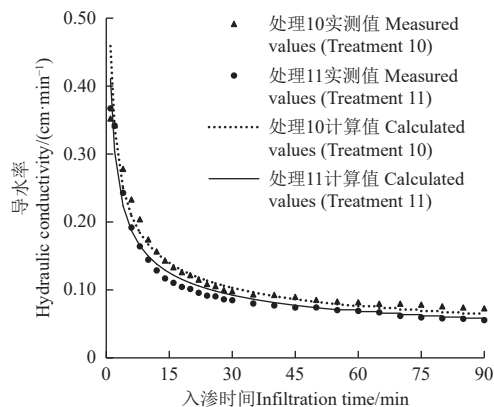


图3 砂土导水率实测值和计算值

Fig.3 Measured and calculated values of sand soil hydraulic conductivity

2.2 多因素影响下导水率变化率动态变化

将导水率对入渗时间求导数,即得浑水饱和和土柱入渗条件下土壤导水率随入渗时间变化的函数关系:

$$k = \frac{dK_h}{dt} = -0.705S^{-0.590}N^{-0.293}t^{-1.439} \quad (5)$$

式中 k 为导水率变化率, cm/min^2 。从式(5)可以看出,导水率变化率随入渗时间的延长逐渐减小,当时间足够长时,导水率变化率逐渐趋于0,导水率趋于稳定。

由于不同因素对导水率变化率的影响不同,分别取其对应含沙率、黏粒含量求偏导数的绝对值,分析导水率变化率受各因素影响的敏感程度^[39]。

$$\left| \frac{k}{S} \right| = \left| 0.415S^{-1.590}N^{-0.293}t^{-1.439} \right| \quad (6)$$

$$\left| \frac{k}{N} \right| = \left| 0.207S^{-0.590}N^{-1.293}t^{-1.439} \right| \quad (7)$$

通过式(6)和式(7)可分别定量计算出浑水含沙率、黏粒含量对导水率变化率的敏感性指标,敏感性指标越大,相应因素变化对导水率变化率的影响越大。各试验处理下导水率变化率均随着各因素增大而减小,故以处理1为例,计算出各因素对导水率变化率的敏感性指标,点绘其随各因素变化的曲线,如图4所示。

由图4可知,各敏感性指标随着相应因素增大而明显减小,表明含沙率和黏粒含量变化对导水率变化率均有显著影响;含沙率敏感性指标为 $1.64 \times 10^{-5} \sim 2.60 \times 10^{-3}$,黏粒含量敏感性指标为 $4.95 \times 10^{-5} \sim 2.10 \times 10^{-3}$,表明黏粒含量和含沙率对导水率变化率影响程度十分接近。入渗时间对各敏感性指标的影响较大,在入渗时间为10 min

时,随着各因素的增大各敏感性指标减小幅度较大,而在入渗时间为30和90 min时,各敏感性指标变化幅度明显减小,在10 min含沙率敏感性指标随着含沙率的增大而减小了 2.2×10^{-3} ,而入渗时间为30和90 min仅分别减小了 5×10^{-4} 和 1×10^{-4} 。这也说明随着入渗的进行,导水率变化率对含沙率和黏粒含量的敏感程度逐渐降低,各因素影响下导水率变化趋势相一致。

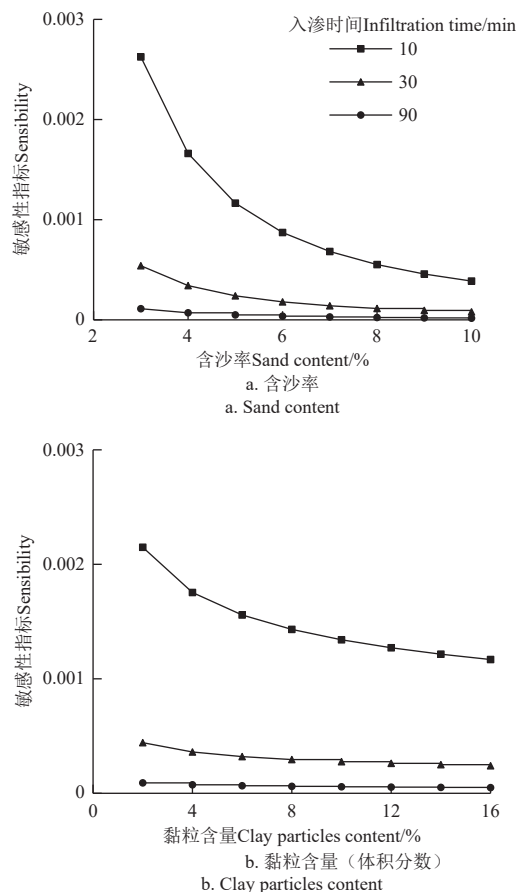


图4 处理1导水率变化率敏感性指标与各因素关系

Fig.4 Relationship between sensitivity of hydraulic conductivity change rate and each factor in experimental treatment 1

2.3 不同土壤质地动态导水率模型的适用性

土壤质地对土壤孔隙大小、形态及分布产生很大的影响,因此不同质地的土壤其饱和和导水率一般不相同。

式(3)中包含了导水能力系数项(a)、含沙率影响项(S^b)、泥沙颗粒级配影响项(N^c)及时间影响项(t^d)。浑水饱和和土柱入渗条件下,部分泥沙进入土体中,而泥沙沉积在土柱表面形成沉积层时会受到入渗速率的影响。为了便于研究,若忽略此影响并不考虑滞留层的作用,则沉积层内部结构是连续均匀的。当含沙率和泥沙相同同时,形成的沉积层结构相同,其厚度随时间不断变化,因此导水能力只受到入渗时间和土柱中土壤土质的影响。

对于不同土质的浑水饱和和土柱导水率动态模型,由砂土得出的含沙率影响项(S^b)和泥沙颗粒级配影响项(N^c)中的指数仍然有效,只有导水能力系数项(a)和时间影响项(t^d)不同。即不同土质浑水饱和和土柱入渗下,导水率模型为

$$K_h = aS^{-0.590}N^{-0.293}t^d \quad (8)$$

分别选取处理 12 和 15 (土质分别为砂壤土和粉壤土, 含沙率 S 均为 6%, 黏粒体积分数 N 分别为 4.22% 和 1.01%) 来推求式 (8) 中的导水能力系数 a 、时间指数 d 。此时式 (8) 中 S 、 N 值均已确定, 式 (8) 可视为导水率随入渗时间变化的幂函数:

$$K_h = t^d \quad (9)$$

式中 α 为拟合系数, α 与导水能力系数 a 、含沙率影响项 S^b 、泥沙颗粒级配影响项 N^c 存在以下的关系:

$$\alpha = aS^{-0.590}N^{-0.293} \quad (10)$$

图 5 为处理 12 和 15 导水率随入渗时间变化图, 对导水率和入渗时间进行幂函数拟合 (见图 5), 拟合结果如下:

$$K_h = 0.014t^{-0.081} \quad (11)$$

$$K_h = 0.004t^{-0.062} \quad (12)$$

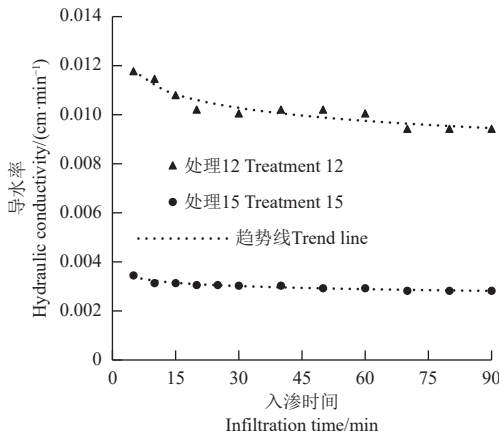


图 5 处理 12 和 15 导水率随入渗时间变化

Fig.5 Hydraulic conductivity versus time for treatments 12 and 15

图 5 中拟合结果的决定系数分别为 0.912 和 0.930 (处理 12 和 15), S_{RMSE} 分别为 2×10^{-3} 和 5×10^{-5} cm/min (处理 12 和 15), 说明式 (8) 对处理 12 和 15 拟合结果良好。由此得出砂壤土和粉壤土的时间项指数 d 分别为 -0.081 和 -0.062, 分别将处理 12 和 15 中的 S 和 N 值代入式 (10) 后得到砂壤土和粉壤土的导水能力系数 a 分别为 0.059 和 0.011。

得出由处理 12 和 15 推求的 a 、 d 值后, 将其代入式 (8), 即可得到砂壤土和粉壤土导水率动态模型, 分别如下:

$$K_h = 0.059S^{-0.590}N^{-0.293}t^{-0.081} \quad (13)$$

$$K_h = 0.011S^{-0.590}N^{-0.293}t^{-0.062} \quad (14)$$

为检验式 (13) 和式 (14) 的可靠性, 分别利用试验处理 13、14、16 及 17 (处理 13、14 土质为砂壤土, 处理 16、17 土质为粉壤土) 对其进行验证, 将试验实测值和模型计算值进行对比分析, 结果见图 6。图 6 中试验实测值和动态模型 (式 (13) 和式 (14)) 计算值的 S_{RMSE} 分别为 2.1×10^{-3} 、 1.2×10^{-3} 、 6.0×10^{-4} 及 3.0×10^{-4} cm/min (< 0.01 cm/min), S_{MARE} 分别为 16.58%、14.90%、15.50% 及 10.46% (处理 13、14、16 及 17), 均小于

17%, 所建立的砂壤土和粉壤土动态模型仍能有效地描述导水率与各因素及入渗时间的量化关系。土壤质地为粉壤土 (处理 16、17) 的导水率动态模型 S_{RMSE} 、 S_{MARE} 均小于砂壤土 (处理 13、14), 模型模拟效果更好, 这是由于粉壤土较砂壤土为细质土, 土体内部结构更为致密, 减弱了入渗过程中浑水泥沙颗粒进入土体内部的滞留作用; 另外粉壤土饱和导水率小于砂壤土, 因此浑水粉壤土饱和土柱入渗速率更小, 泥沙沉积过程受入渗速率影响更小, 形成的沉积层也更均匀, 综合来看更近于假设条件, 因此粉壤土导水率动态模型模拟效果更好。

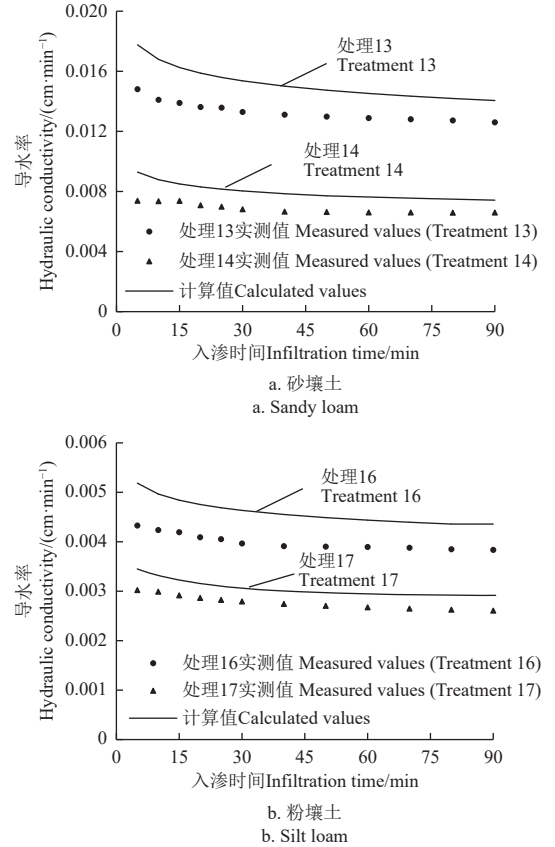


图 6 不同处理导水率实测值和计算值

Fig.6 Measured and calculated values of hydraulic conductivity for different treatments

3 结论

以土壤质地、含沙率及泥沙种类为影响因素, 共进行 17 组浑水饱和土柱入渗试验, 利用多因素分析法建立和验证了浑水砂土饱和土柱入渗下导水率动态模型, 并将此模型推广至砂壤土和粉壤土, 得出如下结论:

1) 浑水含沙率、黏粒含量和入渗时间对导水率影响极显著 ($P < 0.01$), 影响程度由大到小依次为: 入渗时间、浑水含沙率、黏粒含量, 导水率与浑水含沙率、黏粒含量和入渗时间均为负相关; 建立了导水率与各影响因素之间的动态模型, 决定系数 (R^2) 为 0.853, 均方根误差 (S_{RMSE}) 为 0.004 cm/min, 模型验证试验结果中模型计算值与实测值的一致性较好, 两者间的 S_{RMSE} 小于 0.01 cm/min, 相对误差绝对值均值 (S_{MARE}) 小于 7%, 说明基于浑水砂土饱和土柱多因素分析法得到的导水率

动态模型可靠性较高。

2) 导水率变化率随入渗时间的延长逐渐减小, 浑水含沙率和黏粒含量对导水率变化率影响显著且影响程度相近, 各敏感性指标受入渗时间的影响较大。

3) 基于砂土导水率动态模型和假设条件, 建立了适用于砂壤土和粉壤土导水率动态模型, 砂壤土和粉壤土导水率模型 R^2 分别为 0.912 和 0.930, S_{RMSE} 分别为 2×10^{-3} 和 5×10^{-5} cm/min; 模型验证试验结果中模型计算值与实测值的一致性较好, 两者间的 S_{RMSE} 小于 0.01 cm/min, S_{MARE} 小于 17%, 表明模型能够较好地反应砂壤土和粉壤土导水率与各影响因素的量化关系。

[参 考 文 献]

- [1] 黎云云, 畅建霞, 樊晶晶, 等. 气候和土地利用变化下黄河流域农业干旱时空演变及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 84-93.
LI Yunyun, CHANG Jianxia, FAN Jingjing, et al. Agricultural drought evolution characteristics and driving mechanisms in the Yellow River Basin under climate and land use changes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 84-93. (in Chinese with English abstract)
- [2] ALBERS L T, SCHYNS, J F, BOOIJ M J, et al. Blue water footprint caps per sub-catchment to mitigate water scarcity in a large river basin: The case of the Yellow River in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 1-13.
- [3] 赵莺燕, 于法稳. 黄河流域水资源可持续利用: 核心、路径及对策[J]. *中国特色社会主义研究*, 2020(1): 52-62.
ZHAO Yingyan, YU Fawen. Sustainable use of water resource of the Yellow River: Core, path and solution[J]. *Studies on Socialism with Chinese Characteristics*, 2020(1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 39-47.
ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [5] LI H C, Guan Q Y, SUN Y F, et al. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLS model[J]. *Catena*, 2022, 212: 1-18.
- [6] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 112-119.
ZHAO Yang, HU Chunhong, ZHANG Xiaoming, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(21): 112-119. (in Chinese with English abstract)
- [7] 姚雷, 马吉明, 任理. 浑水入渗的滞留物分布特征及影响因素分析[J]. *水力发电*, 2004, 30(11): 20-23.
YAO Lei, MA Jiming, REN Li. Distribution characteristics and influence factors of deposits after the infiltration of muddy water[J]. *Water Power*, 2004, 30(11): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- [8] 毛海涛, 张超, 何涛, 等. 浑水渗流对粗粒土渗透特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 140-150.
MAO Haitao, ZHANG Chao, HE Tao, et al. Influences of seepage of muddy water on the permeability of coarse-grained soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 140-150. (in Chinese with English abstract)
- [9] 钟韵, 费良军, 朱士江, 等. 浑水含沙率对一维垂直入渗特性及致密层形成特性的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 602-609.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, ZHU Shijiang, et al. Effect of sediment concentration of muddy water on one-dimensional Vertical Infiltration characteristics and dense layer formation characteristics[J]. *Soils*, 2022, 54(3): 602-609. (in Chinese with English abstract)
- [10] 卞艳丽, 曹惠提, 张会敏, 等. 浑水灌溉下泥沙级配对土壤水入渗影响的试验研究[J]. *节水灌溉*, 2018(11): 39-47, 50.
BIAN Yanli, CAO Huiti, ZHANG Huimin, et al. An experimental study of muddy water infiltration affected by sediment concentration and size[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(11): 39-47, 50. (in Chinese with English abstract)
- [11] 白瑞, 费良军, 陈琳, 等. 土壤容重对一维垂直浑水肥液入渗水氮运移特性影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(3): 306-311.
BAI Rui, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effects of soil bulk density on water and nitrogen transport characteristics under one-dimensional vertical infiltration of muddy water and fertilizer[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME)*, 2021, 39(3): 306-311. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王进鑫, 黄宝龙, 王迪海. 不同地面覆盖材料对壤土浑水径流入渗规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 68-72.
WANG Jinxin, HUANG Baolong, WANG Dihai. Effect of surface mulching materials on infiltration of muddy water on loamy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(6): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [13] 康守旋, 费良军, 钟韵, 等. 浑水颗粒级配对一维入渗规律及致密层形成特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 222-227.
KANG Shouxuan, FEI Liangjun, ZHONG Yun, et al. Effects of muddy water particle gradation on one-dimensional infiltration law and characteristics of tight layer formation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 222-227. (in Chinese with English abstract)
- [14] 卞艳丽, 曹惠提, 张会敏, 等. 不同泥沙级配浑水灌溉入渗量及减渗作用分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(3): 145-148.
BIAN Yanli, CAO Huiti, ZHANG Huimin, et al. Analysis on infiltration capacity and infiltration reduction effect of muddy water with different sediment gradation under the conditions of irrigation[J]. *Yellow River*, 2015, 37(3): 145-148. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨素宜. 土壤含水量对浑水入渗能力的影响[J]. *太原大学学报*, 2010, 11(2): 127-130.
YANG Suyi. Influence of soil water content on infiltration characteristics of muddy water[J]. *Journal of Taiyuan*

- University(Social Science Edition), 2010, 11(2): 127-130. (in Chinese with English abstract)
- [16] 姜瑞瑞, 费良军, 金世杰, 等. 浑水含沙率和泥沙粒度组成对膜孔灌入渗特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 157-161.
JIANG Ruirui, FEI Liangjun, JIN Shijie, et al. Effects of silt content and clay and sand grade on freedom infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 157-161. (in Chinese with English abstract)
- [17] 白丹, 李占斌. 应用遗传算法拟合浑水入渗经验公式[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 76-79.
BAI Dan, LI Zhanbin. Fitted empirical formula for muddy water infiltration using genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(3): 76-79. (in Chinese with English abstract)
- [18] 钟韵, 费良军, 康守旋, 等. 土壤容重对浑水一维垂直入渗特性及致密层形成特性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(2): 91-98.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, KANG Shouxuan, et al. Effect of soil bulk density on one-dimensional vertical infiltration and dense layer formation characteristics of muddy water[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(2): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- [19] 钟韵, 费良军, 朱士江, 等. 浑水膜孔灌入渗特性与致密层形成特性[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 238-246,254.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, ZHU Shijiang, et al. Infiltration characteristics of muddy water film-hole irrigation and formation characteristics of dense layers[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 238-246,254. (in Chinese with English abstract)
- [20] 白瑞, 费良军, 陈琳, 等. 含沙率对层状土浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 43-49,55.
BAI Rui, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effect of sediment concentration on single point source free infiltration characteristics of muddy water in layered soil with film hole irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 43-49,55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘利华, 费良军, 陈琳, 等. 浑水含沙率对膜孔灌肥液入渗土壤水氮运移特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 120-129.
LIU Lihua, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effects of sediment concentration of muddy water on water and nitrogen transport characteristics under film hole irrigation with fertilizer infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(2): 120-129. (in Chinese with English abstract)
- [22] LIU L H, FEI L J, CHEN L, et al. Effects of initial soil moisture content on soil water and nitrogen transport under muddy water film hole infiltration[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(4): 182-189.
- [23] LIU L H, FEI L J, ZHU H Y, et al. Study on the influence of fertilizer solution concentration on soil water and nitrogen transport characteristics under film hole irrigation[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1653-1665.
- [24] 姜瑞瑞, 费良军, 康守旋. 浑水膜孔灌多向交汇入渗湿润体特征数值研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 190-195.
- JIANG Ruirui, FEI Liangjun, KANG Shouxuan. Numerical study on the characteristics of multi-point interference infiltration wetted body in muddy water film hole irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 190-195. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王全九, 王文焰, 邵明安, 等. 浑水入渗机制及模拟模型研究[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(1): 141-144.
WANG Quanjie, WANG Wenyan, SHAO Ming'an, et al. Mechanism and simulating model for muddy water infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1999, 15(1): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [26] 费良军, 王文焰. 浑水间歇入渗模型研究[J]. *水利学报*, 1999(2): 41-44.
FEI liangjun, WANG Wenyan. Study on mathematical model for muddy water intermittent infiltration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(2): 41-44. (in Chinese with English abstract)
- [27] NASIRIAN A, MAGHREBI M F, MOHTASHAMI A. Numerical and experimental assessment of suspended material effects on water loss reduction from irrigation channels[J]. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 2022, 46(3): 2483-2493.
- [28] DING Y, ZHANG J S, JIA Y, et al. Study on two-phase fluid-solid coupling characteristics in saturated zone of subgrade considering the effects of fine particles migration[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(21): 1-22.
- [29] 盛丰, 方娴静, 吴丹, 等. 灌溉水中悬浮固体对土壤水分入渗性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 98-106.
SHENG Feng, FANG Xianjing, WU Dan, et al. Effects of suspended solids in irrigation water on soil water infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(21): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- [30] 许尚杰, 党发宁, 程素珍. 浑水渗流理论及平原水库防渗技术研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 2093-2098.
XU Shangjie, DANG Faning, CHENG Suzhen. Research of muddy water seepage theory and anti-seepage technique for plain reservoirs[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2093-2098. (in Chinese with English abstract)
- [31] 党发宁, 刘云贺, 陈军强, 等. 浑水渗流理论及其工程应用[J]. *中国科学 (E 辑: 技术科学)*, 2006, 36(9): 1029-1036.
DANG Faning, LIU Yunhe, CHEN Junqiang, et al. Muddy water seepage theory and its application[J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2006, 36(9): 1029-1036. (in Chinese with English abstract)
- [32] XUE H B, DANG F N, LI Y L, et al. Development of piping analysis method for embankment including time-dependent change in permeability coefficient[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(6): 04021090.
- [33] 曾建辉, 马波, 郭迎香, 等. 冻融条件下生物结皮覆盖对土壤饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 348-358.
Zeng Jianhui, Ma Bo, Guo Yingxiang, et al. Effect of biological crust cover on soil saturated hydraulic conductivity under freeze-thaw conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 348-358. (in Chinese with English abstract)

- [34] 刘阿强, 李旭, 刘艳, 等. 全吸力范围内渗透系数快速测定方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3209-3219.
LIU Aqiang, LI Xu, LIU Yan, et al. A rapid determination method of hydraulic conductivity in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3209-3219. (in Chinese with English abstract)
- [35] 介飞龙, 费良军, 钟韵, 等. 土壤初始含水率对膜孔灌溉润体特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 174-181.
JIE Feilong, FEI Liangjun, ZHONG Yun, et al. Effect of initial soil water content on wetting body characteristics of film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 174-181. (in Chinese with English abstract)
- [36] 冯正江, 聂卫波, 余淼, 等. 多尺度土壤入渗特性的变异特征和传递函数构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 64-75.
FENG Zhengjiang, NIE Weibo, YU Miao, et al. Multiple scale variability of soil infiltration characteristics and establishment of pedo-transfer function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 64-75. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王晓彤, 胡振琪, 梁宇生. 基于 Hydrus-1D 的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 76-86.
WANG Xiaotong, HU Zhenqi, LIANG Yusheng. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a Hydrus-1D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 76-86. (in Chinese with English abstract)
- [38] Freeze R A. Henry Darcy and the fountains of Dijon[J]. Ground Water, 1994, 32(1): 23-30.
- [39] 钟韵, 费良军, 傅淦亮, 等. 多因素影响下土壤上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 83-89.
ZHONG Yun, FEI Liangjun, FU Yuliang, et al. HYDRUS simulation and verification of movement characteristics of upward capillary water flow in soil as affected by multi-factor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [40] 李祥东, 邵明安, 赵春雷. 西北干旱区土壤水力参数空间变异与模拟[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1325-1332.
LI Xiangdong, SHAO Ming'an, ZHAO Chunlei. Spatial variability and simulation of soil hydraulic parameters in arid northwest China[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1325-1332. (in Chinese with English abstract)

Effects of muddy water infiltration on the hydraulic conductivity of soils by multiple factors

KANG Shouxuan¹, FEI Liangjun^{1*}, ZHONG Yun², ZHAO Penghui¹, YANG Zhen¹, FAN Qianwen¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The infiltration of muddy water in soil has a complex change of upper boundary process. Among them, the hydraulic conductivity of soil has been one of the most important indicators for the infiltration characteristics of muddy water in the soil. In this study, a series of infiltration tests (9 orthogonal test treatments and 8 groups for the model validation) were performed on the muddy water in the saturated soil column. The hydraulic conductivity of the formed dense layer was also determined during the infiltration of muddy water. The dynamic model was then constructed for the hydraulic conductivity of the sand under multiple factors (sand content of muddy water, clay content, and infiltration time) using multiple regression. A verification test was made on the dynamic models of the hydraulic conductivity of the saturated soil columns in the muddy sandy and silt loam soil. It was assumed that the muddy water was infiltrated into the saturated soil column. The results showed that there were highly significant effects of the muddy water sand content, clay content, the gradation of sediment particles, and infiltration time on the hydraulic conductivity of the sand ($P < 0.01$). The first factor was the infiltration time, followed by the sand content, and the last was the clay content. The coefficient of determination (R^2) was 0.853 in the dynamic model for the hydraulic conductivity of sand, and the root mean square error was 0.004 cm/min, indicating the better-represented relationship between various factors and hydraulic conductivity. Meanwhile, the values of root mean square error was less than 0.01 cm/min, and the mean absolute value of relative error was less than 7%, indicating the highly reliable dynamic model of hydraulic conductivity. The R^2 values of the dynamic model were 0.912 and 0.930 for the sandy and silt loam, respectively, and the values of root mean square error were 2×10^{-3} and 5×10^{-5} cm/min, respectively. The values of root mean square error were less than 0.01 cm/min, and the mean absolute value of relative error was less than 17% in the model validation, indicating the excellent agreement between the calculated and measured. The finding can greatly contribute to the theoretical basis of the infiltration process of muddy water in the soil, together with the barrier mechanism of the dense layer.

Keywords: infiltration; soils; models; muddy water; hydraulic conductivity; multi-factor