

浑水膜孔灌入渗特性与致密层形成特性

钟 韵^{1,2}, 费良军², 朱士江¹, 康守旋², 刘利华², 郝 坤², 介飞龙²

(1.三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002;

2.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)

摘要: 水中带沙是浑水灌溉较清水灌溉的本质区别,为揭示浑水灌溉的节水减渗机制,通过浑水膜孔灌自由入渗室内试验,以清水入渗为对照,研究了浑水膜孔灌入渗能力、湿润锋运移距离、湿润体含水率、致密层土壤颗粒组成及落淤层厚度等随入渗时间的变化规律,提出了土壤含水率与湿润锋运移距离之间的量化模型,分别建立了落淤层厚度与入渗时间、滞留层的滞留量与滞留深度之间的关系。结果表明:浑水泥沙对土壤水分入渗的影响较大,在入渗结束时浑水较清水的累积入渗量减幅达 27.83%;土壤含水率从膜孔中心到湿润锋面逐渐减小,其减小的速率逐渐增大,湿润体半径方向的土壤含水率分布服从椭圆曲线分布。落淤层土壤细颗粒相对含量较浑水泥沙少,其物理性黏粒含量显著低于浑水泥沙。从土壤表面到 6 cm 入渗土层深度为浑水膜孔灌入渗滞留层,滞留层土壤细颗粒含量较原土壤增多,随着入渗土层深度的增大,土壤颗粒组成与原土壤差异逐渐减少,泥沙细颗粒滞留量随着滞留层深度的增大而减小。

关键词: 浑水; 膜孔灌入渗; 致密层; 含沙率; 泥沙颗粒级配组成

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0238-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.01.031

Infiltration Characteristics of Muddy Water Film-Hole Irrigation and Formation Characteristics of Dense Layers

ZHONG Yun^{1,2}, FEI Liangjun², ZHU Shijiang¹, KANG Shouxuan²,

LIU Lihua², HAO Kun², JIE Feilong²

(1. *Water Conservancy and Environmental Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002;*

2. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048*)

Abstract: Sediment carrying in water is the essential difference between muddy water irrigation and clean water irrigation. The muddy water and clean water film-hole irrigation free infiltration experiments were conducted to reveal the water-saving and infiltration reduction mechanism of muddy water irrigation. The changes in the infiltration capacity of muddy water film-hole irrigation, the movement distance of the wet front, the moisture content of the wet body, the soil particle composition of the dense layer, and the thickness of deposition layer with the infiltration time were studied. The quantitative model between the soil moisture content and the wet front movement distance was proposed, the relationship between the thickness of deposition layer and infiltration time, and the relationship between the retention amount and the depth of stranded layer had been established respectively. The results showed that sediment in muddy water had a greater influence on soil water infiltration. At the end of the infiltration, the cumulative infiltration of muddy water compared with clear water decreased by 27.83%. The soil moisture content decreased gradually from the center of film hole to the wetting front, the decreasing rate of soil moisture content increased gradually, and the distribution of soil moisture content in the radius of the wetting body was an elliptic curve. The relative content of fine particles in deposition layer was less than that of muddy water sediment, and its physical clay content was significantly lower than that of muddy cement sediment. The infiltration depth from the soil surface to 6 cm could be used as the stranded layer of the film-hole irrigation with muddy water. The content of fine par-

收稿日期: 2021-08-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(52079105, 51779205); 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201919)

第一作者: 钟韵(1992—), 男, 博士, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: zhongyunjx92@163.com

通信作者: 费良军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉与农业水资源利用研究。E-mail: feiliangjun2008@163.com

titles in the stranded layer was more than that of the original soil. With the increase of infiltration soil layer depth, the difference between the soil particle composition of the stranded layer and the original soil gradually decreased, and the retention volume of fine sediment particles decreased with the increase of the depth of the stranded layer.

Keywords: muddy water; film-hole infiltration; dense layer; sand content rate; sediment particles gradation composition

黄河流域雨量稀少而集中,水土流失严重,致使黄河及其支流的泥沙含量较高,该地区多数灌区均利用浑水进行灌溉^[1]。多年来,高含沙水流灌溉的实践证明^[2],它不仅解决了该地区水资源短缺的问题,而且可显著提高土壤肥力,改善土壤结构,促进作物增产。由于黄河是我国挟带泥沙数量最大的河流,而且也是居世界首位,因此,针对浑水地面灌溉进行研究既反映了我国生产实际的需要,又体现了我国在该研究领域的独特性^[3]。

浑水入渗过程中,泥沙颗粒易在土壤表层沉积,形成致密层使得水分入渗的上边界条件发生改变,土壤阻水能力显著提高^[4-6];致密层的形成,将土壤变成了上实下松的双层结构,其中,土壤上层致密层是整个水分入渗的控制层,对水分入渗起到关键作用,也就是说浑水灌溉条件下,土壤的入渗能力将主要受浑水泥沙致密层的影响^[7]。致密层的形成包含 2 种性质不同的现象:(1)泥沙颗粒沉积形成落淤层,落淤层对水分入渗的影响增加了入渗介质层,延长了水分进入土体的路径;(2)泥沙颗粒滞留形成滞留层,入渗滞留改变的是介质层内颗粒级配,使得土壤孔隙发生变化,减小了水分入渗通道^[8]。

在我国,地面灌溉技术仍是农业发展的核心基础,膜孔灌是我国农田灌溉中应用较广泛的地面灌水技术。膜孔灌利用地膜输水,灌溉水通过膜孔进入到土壤中,既具有地面灌的特点,又具有滴灌局部灌的效果,从而提高了灌溉水利用率,增强了人为对地面灌溉水流入渗的操控性,较常规地面灌具有节水、保肥等特点^[9-12]。由于膜孔灌的诸多优点,使得这种地面灌水技术适合在我国北方地区大面积推广应用,具有十分广阔的应用前景。

目前,国内外在膜孔灌地面灌水技术方面主要是针对清水开展了较多的试验研究工作,而有关浑水方面的研究,国外鲜有报道。西安理工大学近年来开展了浑水膜孔灌入渗水氮运移方面的试验研究^[4,13-15],取得了相应研究成果,但关于浑水灌溉的节水减渗机制及泥沙致密层形成规律等方面的研究较少,而浑水灌溉的入渗机制、节水机理较清水更为复杂。因此,本文拟基于现有研究成果,开展浑水膜孔灌入渗特性与致密层特性的研究,以期缓解我国北方地区

水资源紧缺问题,也更加突出了浑水灌溉在我国研究的特色与优势。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室进行,试验土样为粉砂壤土,采自西安市灞桥区,风干碾碎后过 2 mm 筛,土壤初始质量含水量为 2.93%,土壤饱和质量含水量为 36.87%,物理性黏粒含量为 25.06%,饱和导水率为 0.017 2 cm/min,田间持水量为 25.61%,土壤颗粒组成通过 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪测定,粒径 $d \leq 0.002$, $0.002 < d \leq 0.05$, $0.05 < d \leq 2$ mm 含量体积分数分别为 12.58%,74.98%,12.44%。

1.2 试验浑水泥沙

结合黄河流域引黄河水灌区浑水灌溉泥沙的特点,通过从泾惠渠灌区取回的灌溉水水样,分析灌溉浑水的含沙率和泥沙颗粒级配组成等特点。将从室外取得的不同颗粒级配组成的泥沙风干后过 1 mm 土筛后,通过称重法人工调配成含沙率为 6%、物理性黏粒含量为 9.87% 的浑水,配置成的浑水泥沙颗粒粒径在 0~0.002,0.002~0.005,0.005~0.01,0.01~0.05,0.05~1 mm 的体积含量分别为 2.62%,3.47%,3.78%,51.68%,38.45%。

1.3 试验方法

浑水膜孔灌单点源自由入渗试验装置见图 1,其由 3 部分组成:土箱、膜孔装置和马氏瓶。试验土箱由 10 mm 厚的有机玻璃板制成,长、宽、高分别为 35,25,40 cm。试验前将土箱内壁清理干净,土样按照干容重 1.40 g/cm³ 分层(5 cm)称重均匀装入试验土箱;装土过程中在土壤层间打毛,防止水分入渗过程中土壤出现分层不连续的现象,采用夯实工具将土壤压实到预定高度。为便于观测入渗过程中湿润锋的运移,入渗源采用 1/4 的膜孔面积的方形水室,水室采用 5 mm 厚有机玻璃制成,为模拟膜孔灌时的充分供水,试验过程中,通过加装有自动搅拌系统的马氏瓶^[3]保持水室水头高 2.5 cm。将方形水室紧贴土壤表面固定在土箱一角,土壤表面覆膜,静置 24 h。

1.4 测定及计算项目

1.4.1 测定项目 浑水灌溉后土壤的结构见图 2,本文

将致密层分成落淤层和滞留层 2 个部分来分析。

(1) 累积入渗量 (cm): 通过马氏瓶读数计算出累积入渗量。

(2) 土壤含水率 (%): 采用烘干法测量土壤含水率。

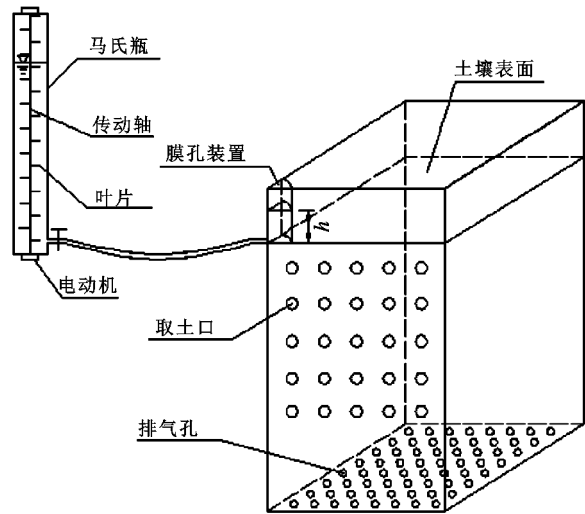


图 1 浑水膜孔灌自由入渗试验装置

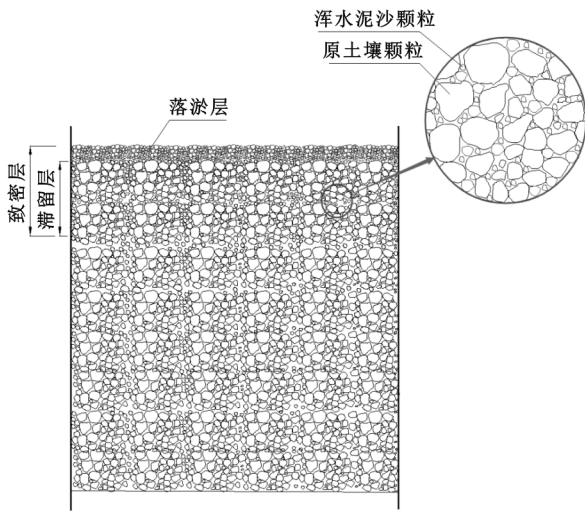


图 2 浑水入渗后土壤结构示意图

(3) 湿润锋运移距离 (cm): 在透明有机玻璃箱外壁上定时描绘出不同入渗时刻所对应的湿润锋的位置及形状。

(4) 落淤层厚度 (cm): 土样均匀装入试验土箱后, 在透明有机玻璃土箱外壁标记上表土位置, 将土箱表土处的标记做为表土“本体”和落淤层“客体”的分界线; 入渗开始后, 每隔 5 min 使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量从表土标记处到落淤层表面的距离即为落淤层厚度。

(5) 落淤层、滞留层土壤颗粒组成 (%): 采用 Mastersizer-2000 型激光泥沙粒度仪测定。

(6) 滞留层泥沙细颗粒滞留量 (%): 粒径 < 0.01 mm 的物理性黏性颗粒是浑水泥沙颗粒中十分活跃的部分, 其含量是直接影响浑水入渗规律的主要因素, 为了对参与运移的泥沙细颗粒进行量化分析, 将

滞留层各层土壤物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 的增加量概化为各层泥沙细颗粒滞留量。

1.4.2 计算项目 利用分形理论定量描述土壤结构特征具有一定的独特优势。土壤颗粒累积体积分布与平均粒径的分形关系式^[16-17]为:

$$\frac{V_{(\delta < d_i)}}{V_0} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中: δ 为土壤颗粒的粒径变量; d_i 为 2 筛分粒级 d_i 和 d_{i+1} 间粒径的平均值; $V_{(\delta < d_i)}$ 为粒径 < d_i 的土壤颗粒累积体积; V_0 为土壤各粒级质量的总和, 土壤机械组成用体积百分含量表示, 此时 $V_0 = 100$; $d_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径; D 为分形维数, 土壤粒径分形维数值为 0~3。

对公式(1)两边求对数形式, 整理得:

$$D = 3 - \frac{\lg(V_i/V_0)}{\lg(d_i/d_{\max})}$$
$$\lg \frac{V(\delta < d_i)}{V_0} = (3-D) \lg \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right) \tag{2}$$

首先由土壤颗粒机械组成数据可确定土壤样品不同粒径 d_i 的 $\lg(V_i/V_0)$ 和 $\lg(d_i/d_{\max})$ 值, 然后分别以 $\lg(V_i/V_0)$ 和 $\lg(d_i/d_{\max})$ 为纵坐标和横坐标, 点绘在坐标系上, 将所得的点进行线性回归分析求得斜率 K , 则土壤分形维数为 $D = 3 - K$ 。

1.5 数据处理与分析

利用统计学中均方根误差 (RMSE)、偏差百分比 (PBIAS) 和平均绝对误差 (MAE) 3 个指标, 对计算值与试验观测值之间的符合度进行评价分析。其中, RMSE 和 MAE 越接近 0, PBIAS < ±10% 时, 表示计算值与试验观测值差异越小, 两者吻合越好。各指标定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \tag{3}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \times 100\% \tag{4}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \tag{5}$$

式中: x_i 为第 i 个观测值; y_i 为第 i 个计算值; n 为数据总个数。

2 结果与分析

2.1 浑水膜孔灌入渗特性

2.1.1 单位膜孔面积累积入渗量变化特性 由图 3 和图 4 可知, 在入渗初期, 清水与浑水的入渗率均较大, 两者相应的累积入渗量差异不大; 随着入渗历时的延长, 两者的入渗率不断减小并逐渐趋于稳定, 而清水与浑水的累积入渗量差异逐渐增大, 在入渗结束时, 清水和浑水膜孔灌累积入渗量分别为 54.05,

39.01 cm,浑水较清水的入渗量减幅达 27.83%,对应入渗率的减幅为 18.34%,表明浑水泥沙对土壤入渗的影响逐渐增强。

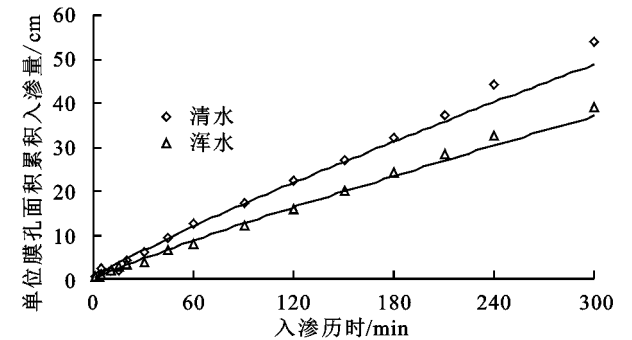


图3 膜孔灌累积入渗量随时间变化

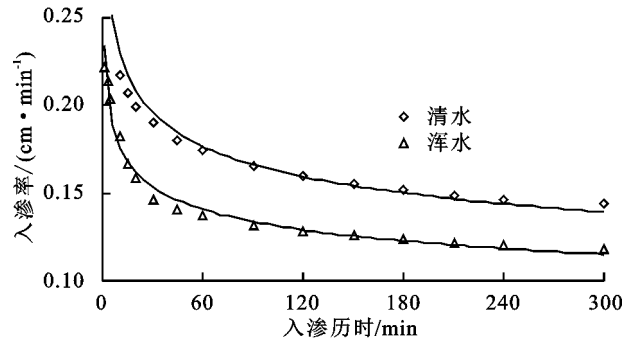


图4 膜孔灌入渗率随时间变化

本研究表明,清水膜孔灌入渗量符合 Kostiakov 模型、Philip 模型及简化的 Philip 模型,本文分别利用这 3 个入渗模型对图 3 中浑水膜孔灌入渗量曲线进行拟合。由表 1 可知,利用简化的 Philip 模型拟合的决定系数 <0.9 ,且 RMSE、MAE 和 PBIAS 分别为 4.525 9,3.945 6 cm 和 -14.5990% ,RMSE 和 MAE 均较大, $|PBIAS|>10\%$,表明利用简化的 Philip 模型拟合效果不佳;Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合的决定系数均接近于 1,相关系数均大于临界相关系数,RMSE 和 MAE 均接近 0, $|PBIAS|$ 均 $<10\%$,说明利用这 2 种入渗模型均能有效地拟合浑水膜孔灌累积入渗量与入渗时间之间的关系,其中,Kostiakov 入渗模型拟合的决定系数最高,RMSE、MAE 和 $|PBIAS|$ 最小,表明其拟合精度最高,且由于 Kostiakov 入渗模型形式较简单、计算方便,因此,本文采用 Kostiakov 入渗模型描述浑水膜孔灌水分入渗规律。

采用 Kostiakov 入渗模型对图 3 中清水和浑水膜孔灌累积入渗量曲线进行拟合:

清水 $I=0.3321t^{0.8747}$ $R^2=0.982\ 2$ (6)

浑水 $I=0.2178t^{0.9003}$ $R^2=0.995\ 9$ (7)

可知,浑水膜孔灌入渗模型的入渗系数比清水的小,而入渗指数比清水的略大。

2.1.2 湿润锋运移变化规律 由图 5 和图 6 可知,膜孔灌自由入渗的湿润体形状近似于半椭球体;在入

渗开始阶段,湿润体水平方向湿润锋运移距离大于垂直方向,因为入渗开始时,水平湿润锋由零瞬时增至膜孔半径,而垂直方向湿润锋运移距离是从零开始。随着入渗时间的逐渐延长,湿润体不断扩大,湿润体形状逐渐呈长半椭球形,这主要是因为垂直方向的水分运动比水平方向增加了重力势的作用,所以垂直方向的湿润锋推进速度比水平方向湿润锋推进速度快。

表 1 浑水膜孔灌单位膜孔面积入渗量与入渗历时关系拟合结果

项目	Kostiakov 模型	Philip 模型	简化的 Philip 模型
模型形式	$I=Kt^a$	$I=S_t^{1/2}+At$	$I=S_t^{1/2}$
拟合方程	$I=0.2178t^{0.9003}$	$I=0.0994t^{1/2}+0.1202t$	$I=1.7643t^{1/2}$
决定系数(R^2)	0.9959	0.9871	0.8727
RMSE/cm	0.9587	0.9624	4.5259
PBIAS/%	2.3012	4.5920	-14.5990
MAE/cm	0.5965	0.6399	3.9456

研究表明,湿润锋在水平方向和垂直方向的运移距离分别为椭圆曲线的半长轴和半短轴,则椭圆曲线方程可表示为:

$$\frac{x^2}{S_x^2}+\frac{z^2}{S_z^2}=1 \tag{8}$$

式中: S_x 为浑水和清水膜孔灌湿润锋在水平方向的最大运移距离(cm); S_z 为浑水和清水膜孔灌湿润锋在垂直方向的最大运移距离(cm)。

对比图 6 中浑水膜孔灌湿润锋形状与椭圆曲线的吻合度表明,当入渗时间 t 在 10 min 时,实测湿润锋形状与椭圆曲线的 RMSE、PBIAS 和 MAE 分别为 0.07 cm, -2.95% 和 0.05 cm, RMSE 和 MAE 都接近 0, $|PBIAS|<10\%$;当 t 在 45, 90, 210, 300 min 时,实测湿润锋形状与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 均接近 0, $|PBIAS|$ 均 $<10\%$ 。结果表明,浑水膜孔灌湿润锋与椭圆曲线一致性较好,因此,可使用椭圆曲线方程表示其湿润锋形状。

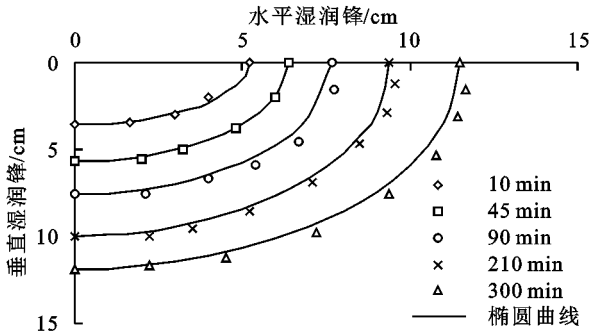


图5 清水湿润锋随时间变化

2.1.3 湿润体内含水率分布特性 为了研究浑水膜孔灌湿润体含水率分布特点,绘制了浑水膜孔灌土壤

含水率等值线(图 7)。不同入渗历时的土壤含水率从膜孔中心到湿润锋面均逐渐减小,等值线密度逐渐变大,即湿润体土壤含水率减小的速率逐渐增大。

由图 8 可知,湿润体水平和垂直方向的含水率分布近似于椭球曲线,根据计算结果可知,当入渗历时分别为 45,90,210,300 min 时,水平方向湿润体土壤含水率值与椭圆曲线的 RMSE 分别为 1.75%,1.03%,0.76%,0.60%,PBIAS 分别为 -0.64%,1.02%,1.78%,1.62%,MAE 分别为 1.29%,0.72%,0.49%,0.46%;垂直方向湿润体土壤含水率值与椭圆曲线的 RMSE 分别为 0.97%,0.88%,0.73%,0.76%,PBIAS 分别为 2.23%,1.88%,1.68%,1.99%,MAE 分别为 0.62%,0.61%,0.55%,0.58%;2 个方

向的 RMSE 和 MAE 都接近 0,|PBIAS| 均<10%,表明水平和垂直方向湿润体半径的土壤含水率分布均与椭圆曲线拟合较好。因此,可认为任意方向湿润体半径的土壤含水率变化都符合椭圆曲线。

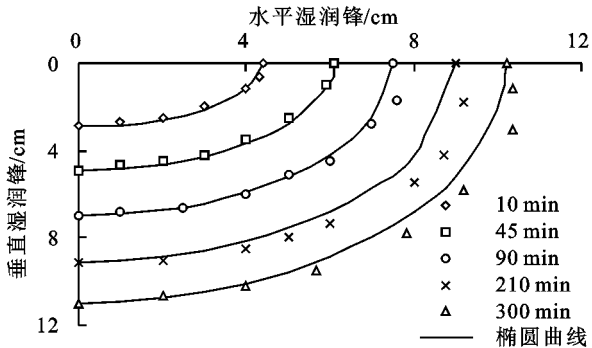


图 6 浑水湿润锋随时间变化

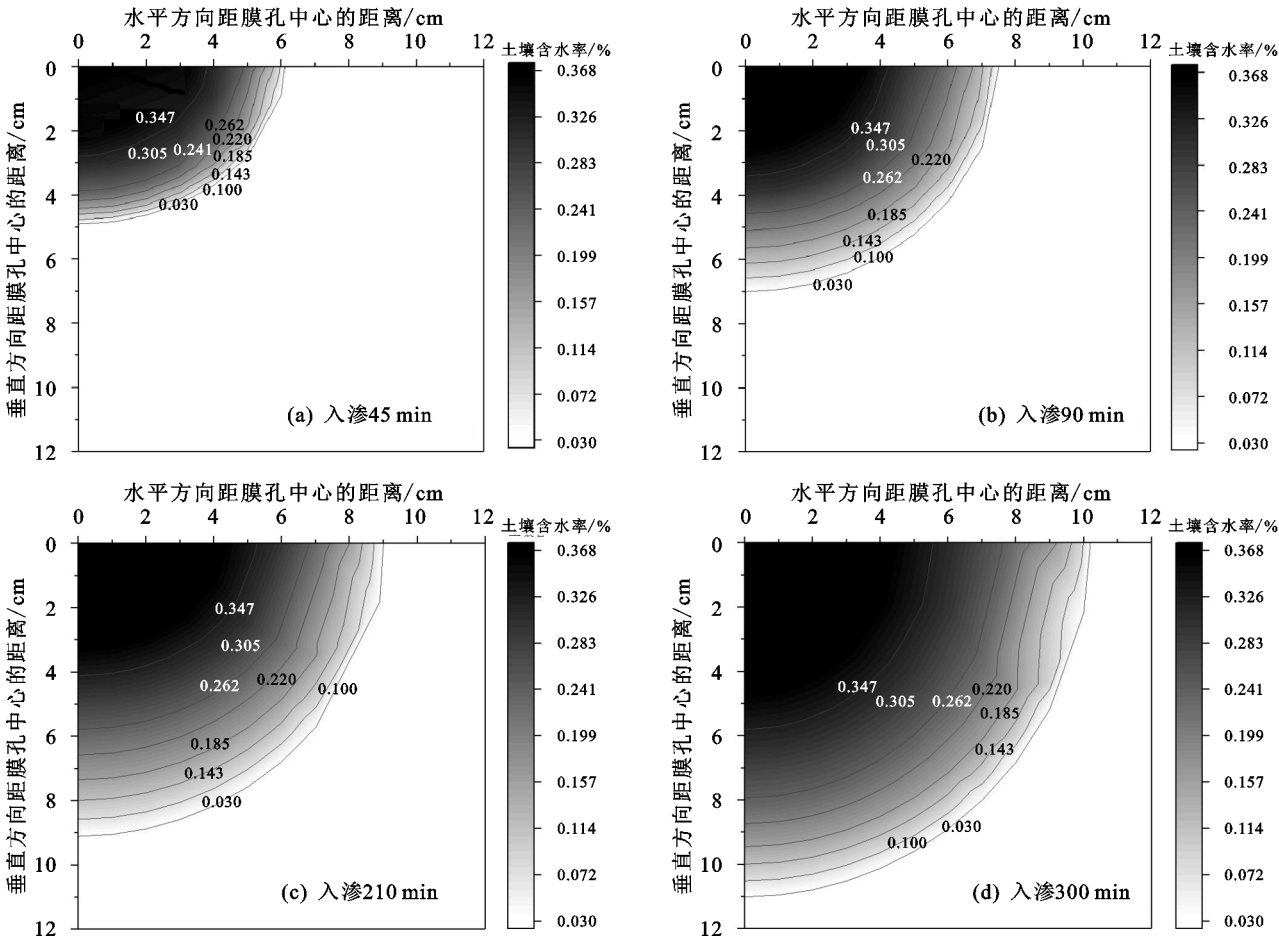


图 7 浑水膜孔灌土壤含水率等值线

则湿润体内任意一点的土壤含水率满足椭圆曲线方程:

$$\frac{(\theta-\theta_0)^2}{(\theta_s-\theta_0)^2}+\frac{x^2}{r^2}=1 \tag{9}$$

式中: r 为湿润体半径(cm),其等效半径可用几何平均值表示为 $r=\sqrt[3]{S_x^2 S_z}$; x 为湿润体半径上的点与膜孔中心点的距离(cm); θ 为该点的含水率(%)。

2.2 浑水膜孔灌入渗致密层形成特性

2.2.1 落淤层厚度变化规律 由图 9 和图 10 可知,落淤

层厚度均随入渗历时的增大而增大;入渗初期(0~10 min),落淤层厚度较小;入渗中期(10~170 min),落淤层厚度增加较快,随着入渗的进行,厚度增加速率逐渐变小;入渗后期(170~300 min),落淤层厚度增幅基本稳定。

研究表明,浑水膜孔灌入渗落淤层厚度随入渗时间的变化曲线符合幂函数关系,设

$$H=a(t-10)^b \tag{10}$$

式中: H 为落淤层厚度(mm); a 、 b 为拟合系数和拟合指数。

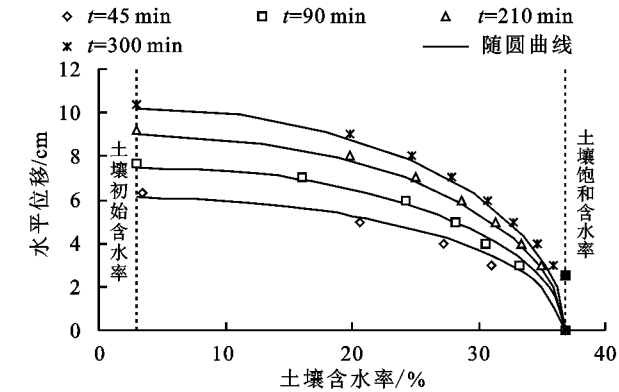


图 8 湿润体半径方向土壤含水率分布

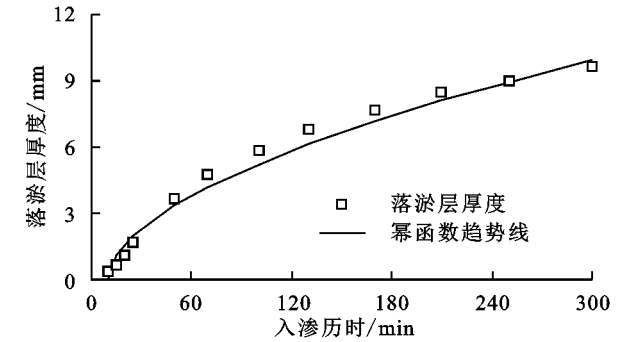


图 9 落淤层厚度随入渗时间变化

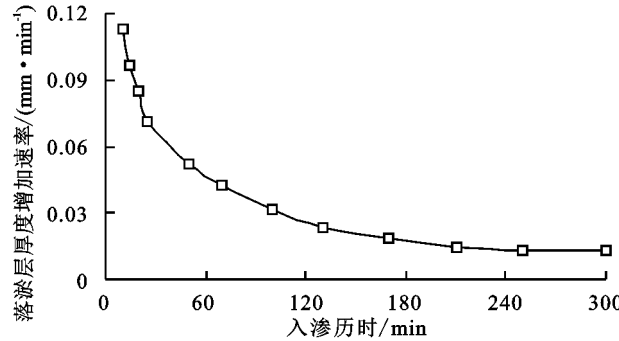
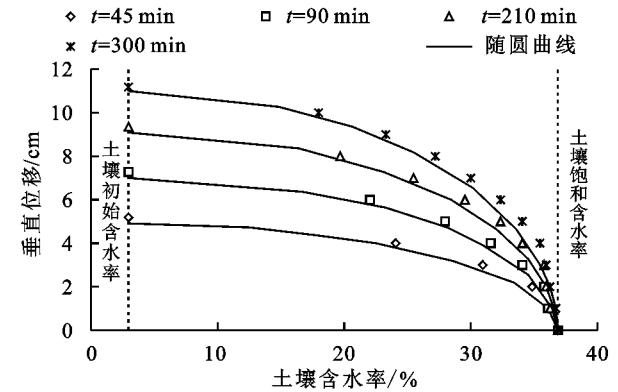


图 10 落淤层厚度增加速度随入渗时间变化

利用公式(10)对图 9 中实测数据进行拟合,其相关系数 r 均大于临界相关系数 0.683 5,说明利用幂函数能有效地拟合浑水膜孔灌落淤层厚度与入渗时间之间的关系。

$$H=0.4433(t-10)^{0.5482} \quad R^2=0.9613 \quad (11)$$

2.2.2 致密层颗粒组成变化规律 由图 11 可知,落淤层中细颗粒相对含量较浑水泥沙的少,其中黏粒、粉粒含量较浑水泥沙分别减少 51.91%,35.16%,而大颗粒相对含量较浑水泥沙的多,沙粒含量较浑水泥沙增多 57.43%。由表 2 可知,落淤层物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 明显低于浑水泥沙,减幅为 50.46%,表明浑水膜孔灌入渗过程中,泥沙不仅发生了沉积现象,还存在滞留现象,沉积对入渗的影响是增加了入渗土体厚度,而入渗滞留改变的是表层土壤的颗粒级配组成,部分细颗粒会伴随着入渗水洗入土体滞留在表层土壤孔隙中,因此,土壤表层的落淤层细颗粒含量低



于入渗浑水中泥沙细颗粒含量。

图 11 落淤层土壤颗粒组成含量

由图 12 可知,在入渗深度为 0~1 cm 处的土壤颗粒组成与原土的差异最大,土壤颗粒中细颗粒含量较原土壤的多,其中,黏粒含量较原土壤增加 107.71%,而较大颗粒含量较原土壤的比例相对减少,其中沙粒含量较原土壤相对减少 33.13%;在入渗深度为 1~2,2~3 cm 处土壤颗粒组成与原土壤差异较明显,土壤细颗粒含量均较原土壤的高,黏粒含量较原土壤分别增加 72.89%,59.94%,而较大颗粒含量均较原土壤的比例相对减少,沙粒含量较原土壤比例分别减少 24.69%,15.60%;在入渗深度为 3~4,4~5 cm 处土壤颗粒组成与原土壤存在差异,土壤细颗粒含量均比原土壤的高,黏粒含量较原土壤分别增加 28.86%,15.02%,而较大颗粒含量较原土壤的比例相对减少,沙粒含量较原土壤比例分别减少 5.44%,7.73%。在入渗深度为 5~6 cm 处的土壤颗粒组成与原土壤的差异较小,仅仅是细颗粒含量略大于原土壤中的含量,黏粒含量较原土壤增多 6.04%,说明浑水膜孔灌入渗过程中泥沙细颗粒伴随入渗水洗入土体后,其主要滞留分布在 0~6 cm 深度的土体中,因此从土壤表面到 6 cm 土壤深度处可作为浑水膜孔灌入渗滞留层。

由表 2 的浑水膜孔灌滞留层土壤颗粒分析结果可知,滞留层土壤物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 明显高于原土壤,其中 0~1,1~2,2~3,3~4,4~5,5~6 cm 处增幅分别为 46.24%,37.11%,31.57%,20.21%,

12.79%,2.95%,随着入渗土层深度的增大,土壤物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 逐渐减少,是由于浑水泥沙中的细颗粒进入了滞留层,从而增加了其物理性黏粒含量

表 2 入渗结束后土壤颗粒分析结果

供试土壤	黏粒含量	粉粒含量/%				沙粒含量/%		物理性黏粒	滞留量
	(0~0.002	0.002~0.01	0.01~0.02	0.02~0.05	0.05~0.20	0.20~2	含量($d_{0.01}$)	(0~0.01	
	mm)/%	mm	mm	mm	mm	mm	(0~0.01 mm)/%	mm)/%	
泥沙	2.62	7.25	8.39	43.29	38.45	0	9.87	—	
落淤层	1.26	3.63	3.33	31.25	60.53	0	4.89	—	
原土	12.58	36.30	23.16	15.52	9.34	3.10	48.88	—	
滞留层 0~1 cm	26.13	45.35	12.33	7.87	6.78	1.54	71.48	22.60	
滞留层 1~2 cm	21.75	45.27	13.59	10.02	7.40	1.97	67.02	18.14	
滞留层 2~3 cm	20.12	44.19	15.03	10.16	8.14	2.36	64.31	15.43	
滞留层 3~4 cm	16.21	42.55	17.66	11.82	8.86	2.90	58.76	9.88	
滞留层 4~5 cm	14.47	40.66	20.37	13.02	8.52	2.96	55.13	6.25	
滞留层 5~6 cm	13.34	36.98	23.55	13.98	9.34	2.81	50.32	1.44	

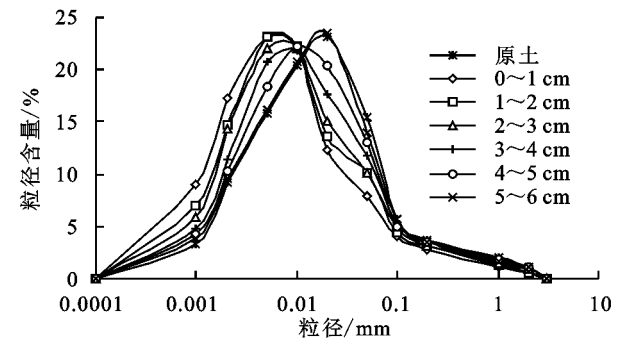


图 12 滞留层土壤颗粒组成含量曲线

2.2.3 滞留层土壤颗粒的分形特征 根据滞留层不同位置处土壤的颗粒组成试验数据,分别计算浑水膜孔灌滞留层不同位置的分形维数,计算结果见表 3。拟合的决定系数均高于 0.90,均方根误差均 <0.14 ,表明拟合精度较高;滞留层土壤颗粒分形维数均大于原土壤的分形维数,这是由于滞留层有浑水泥沙洗入,增大了细颗粒相对含量,土壤颗粒分形维数对细颗粒的依赖性最大,其随着细颗粒的增加而增加。随着滞留层深度的增大,土壤分形维数逐渐减小,直至减小到与原土壤的分形维数一致,其中 0~1,1~2,2~3,3~4,4~5,5~6 cm 位置处滞留层土壤分形维数分别比原土壤的高 2.88%,2.22%,1.81%,1.10%,0.69%,0.29%,表明浑水膜孔灌入渗过程中,泥沙对滞留层土壤颗粒分形维数影响显著($P<0.05$),并且随着滞留层深度的不同,其分形维数也存在显著差异($P<0.05$)。

为了进一步探讨土壤颗粒组成与分形维数的关系,对滞留层不同位置处土壤颗粒分形维数 D 和各粒径分级之间进行相关分析,分析结果见表 4。分形维数 D 与黏粒体积百分含量之间呈极显著正相关关系($P<0.01$),与粉粒、极细砂粒和细砂粒体积百分含量之间呈极显著负相相关关系($P<0.01$),与中砂粒、粗砂粒和极

$d_{0.01}$,随着入渗时间的增加,入渗土体表面致密层逐渐形成,阻碍更多的细颗粒进入土体,因此,随着土壤入渗深度的增大滞留层细颗粒含量逐渐减小。

粗砂粒体积百分含量之间相关性不显著。

表 3 滞留层不同位置处土壤颗粒的分形维数

供试土壤	分形维数	决定系数	均方根误差
原土	2.7713	0.9413	0.1024
滞留层 0~1 cm	2.8510	0.9624	0.1007
滞留层 1~2 cm	2.8327	0.9655	0.1062
滞留层 2~3 cm	2.8215	0.9147	0.1275
滞留层 3~4 cm	2.8019	0.9028	0.1330
滞留层 4~5 cm	2.7903	0.9225	0.1107
滞留层 5~6 cm	2.7792	0.9398	0.1047

2.2.4 滞留层的滞留量变化特性 为了对参与运移的泥沙细颗粒进行量化分析,将滞留层各层土壤物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 的增加量概化为各层泥沙细颗粒滞留量,由表 2 可知,滞留层 0~1,1~2,2~3,3~4,4~5,5~6 cm 处泥沙细颗粒滞留量分别为 22.60%,18.14%,15.43%,9.88%,6.25%,1.44%,其中,所得的泥沙细颗粒滞留量为各层的平均滞留量,若是直接将各层的平均滞留量进行拟合,将忽略了层内滞留量的变化情况。本研究表明,泥沙细颗粒滞留量在滞留层应该是呈渐变分布规律,即随着滞留层深度越大,滞留量越小,这是滞留层滞留量的总体变化趋势,因此,为了体现出滞留量的渐变分布规律,采用累积滞留量的数据对其进行研究。

由图 13 可知,累积滞留量随入渗土层深度的增大而增大;土层深度较小时,滞留层的累积滞留量增加较快,随着入渗土层深度的增加,累积滞留量最终趋于稳定,相应的累积滞留量增加速率逐渐变小,直至基本趋于 0,这是由于在浑水入渗后期,土壤表面致密层已经形成,浑水中泥沙颗粒主要以落淤层形式沉积于土壤表面,将不存在滞留现象,所以,累积

滞留量随深度是收敛的,即在总空间上有 1 个累积滞留量最大值。

表 4 滞留层不同位置处土壤颗粒分形维数与土壤粒度组成之间的相关关系

相关系数(<i>r</i>)	分形维数(<i>D</i>)	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	极细砂粒 (0.05~0.1 mm)	细砂粒 (0.1~0.25 mm)	中砂粒 (0.25~0.5 mm)	粗砂粒 (0.5~1 mm)	极粗砂粒 (1~2 mm)
分形维数	1.000							
黏粒	0.9918 **	1.000						
粉粒	-0.9890 **	-0.9964 **	1.000					
极细砂粒	-0.9307 **	-0.9301 **	0.9012 **	1.000				
细砂粒	-0.9804 **	-0.9876 **	0.9783 **	0.9208 **	1.000			
中砂粒	-0.7031	-0.7507	0.7417	0.6526	0.7556 *	1.000		
粗砂粒	-0.3635	-0.2591	0.2772	0.2546	0.2023	-0.1450	1.000	
极粗砂粒	-0.4674	-0.5067	0.4804	0.5363	0.5493	0.0904	-0.1684	1.000

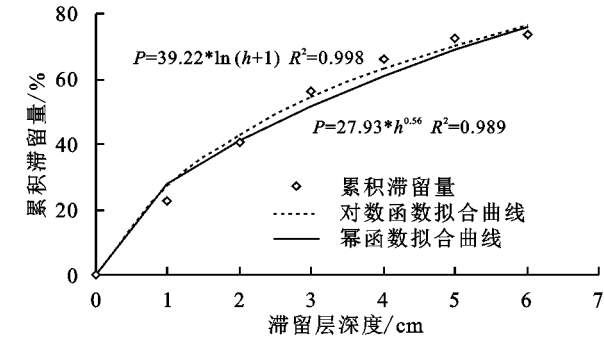


图 13 滞留层的累积滞留量随土层深度的变化曲线

研究表明,浑水膜孔灌滞留层的累积滞留量与入渗土层深度之间符合对数函数和幂函数关系,设

$$P=a\ln(h+1) \tag{12}$$

$$P=bh^c \tag{13}$$

式中: P 为累积滞留量(%); H 为滞留层的土层深度(cm); a 、 b 、 c 为拟合系数。

分别利用这 2 个模型对浑水膜孔灌滞留层的累积滞留量进行拟合。2 个模型拟合的决定系数 R^2 分别为 0.998, 0.989, 2 个模型拟合的均方根误差 (RMSE) 分别为 3.13%, 4.38%, 表明利用这 2 个模型拟合浑水膜孔灌滞留层的累积滞留量与入渗土层深度之间的关系均满足计算精度要求。

将累积滞留量对入渗土层深度求导数,得单位深度上的滞留量 dp/dh , 即滞留密度。

由公式(12)得:

$$\frac{dP}{dh}=\frac{a}{h+1} \tag{14}$$

由公式(13)得:

$$\frac{dP}{dh}=bch^{c-1} \tag{15}$$

浑水泥沙细颗粒滞留量在滞留层呈逐渐减小规律分布,单位深度上的滞留量 dp/dh 是随滞留深度 h 的增加而减小的;试验过程中发现,土柱结构没有发生破坏,滞留层表层有泥沙细颗粒滞留含量的最大

值,表明浑水膜孔灌滞留层表面的泥沙细颗粒滞留密度为一有限值,而不是无限增大,即 $\lim_{h \rightarrow 0}(dp/dh)$ 不为零常数,显然利用幂函数不能满足这条件,而利用对数函数能满足该条件。因此,本文选用对数函数拟合浑水膜孔灌累积滞留量与滞留层深度之间的关系,其既满足了计算精度要求,又符合了累积滞留量的物理特性,物理意义比较明显。利用公式(12)的对数函数拟合浑水膜孔灌累积滞留量的结果为:

$$P=39.22\ln(h+1) \quad R^2=0.998 \quad (16)$$

3 讨论

本文主要研究浑水灌溉过程中泥沙挂淤、落淤及滞留对土壤入渗能力的影响,并且研究土壤表面落淤层厚度及致密层(落淤层和滞留层)土壤颗粒组成等的变化特征。已有研究^[18-19]表明,粒径<0.01 mm 的物理性黏性颗粒是浑水泥沙颗粒中十分活跃的部分,其含量直接影响浑水入渗规律,因此,本文为了对参与运移的泥沙细颗粒进行量化分析,将滞留层各层土壤物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 的增加量概化为各层泥沙细颗粒滞留量。

本研究表明,落淤层厚度在入渗初期较小,这主要是由于浑水中泥沙颗粒伴随着入渗水将进入到土壤孔隙中,主要以滞留层形式进入到表层土壤,所以落淤层厚度很小;入渗中期厚度增加较快,但厚度增加速率逐渐变小,这是由于随着浑水累积入渗量的增加,土壤孔隙逐渐被泥沙颗粒填充,浑水中泥沙小颗粒继续洗入到土壤孔隙中,以滞留形式进入到土壤,而浑水中较大泥沙颗粒则沉积在土体表面形成落淤层,入渗过程中落淤层逐渐加厚,阻塞入渗通道,并延长了水分进入土体的路径,使得土壤导水能力变弱,进一步阻碍浑水入渗,由于浑水入渗量减小,供水速度减慢,导致落淤层厚度增加速率逐渐变小;入渗后期落淤层厚度增幅稳定,是由于浑水膜孔灌入渗率已

基本趋于稳定,此时土壤表面致密层已经形成,泥沙颗粒主要以落淤层形式沉积于土壤表面,浑水入渗能力随入渗时间减小的幅度较小,所以落淤层厚度增幅也逐渐趋于基本稳定。

本研究发现,浑水膜孔灌入渗过程中,泥沙对滞留层土壤颗粒分形维数影响显著($P < 0.05$),并且随着滞留层深度的不同,其分形维数也存在显著差异($P < 0.05$),这是由于随着滞留层深度的增加,泥沙细颗粒伴随入渗水洗入到土壤中的相对含量越少,从而其土壤颗粒分形维数减小,表明土壤颗粒分形维数在一定程度上反映了土壤颗粒组成的变化规律。通过对滞留层不同位置处土壤颗粒分形维数和各粒径分级之间进行相关分析发现,分形维数(D)与黏粒体积百分含量之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$),得出的质地越粗分形维数越小、质地越细分形维数越大的结论与前人^[20-21]研究一致;分形维数(D)与粉粒、极细砂粒和细砂粒体积百分含量之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),这与前人^[22]研究得出的分形维数(D)与粉粒体积百分含量之间呈显著正相关结果有所不同,这是由于学者们选择的粒径分级标准不同,其中,文星跃等^[23]研究表明,分形维数(D)与细粉粒体积百分含量之间呈正相关,而与粗粉粒体积百分含量之间呈负相关,这也有效地解释学者们就粉粒体积百分含量对分形维数(D)的影响得出不同研究结论的原因;分形维数(D)与中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒体积百分含量之间相关性不显著。因此,可以用分形维数(D)定量描述浑水膜孔灌入渗滞留层土壤颗粒组成的变化,从而进一步研究致密层的形成和发展特性。

4 结论

(1)浑水膜孔灌入渗初期,清水与浑水的累积入渗量差异不大;随着入渗历时的延长,浑水入渗能力较清水逐渐减小,两者的累积入渗量差异逐渐增大,但两者入渗率均逐渐趋于稳定。浑水入渗的湿润体形状近似于椭球体,可采用椭圆曲线表示湿润锋剖面。

(2)落淤层厚度随入渗历时的增大而增大,两者符合幂函数正相关关系,入渗初期(0~10 min)的落淤层厚度较小;入渗中期(10~170 min)的落淤层厚度增加较快,随着入渗的进行,厚度增加速率逐渐变小;入渗后期(170~300 min)的浑水膜孔灌落淤层厚度稳定增加。

(3)落淤层中土壤细颗粒相对含量较浑水泥沙的少,其中物理性黏粒含量明显低于浑水泥沙。从土壤表面到 6 cm 土壤深度作为浑水膜孔灌入渗滞留层,其中在 0~1 cm 深度的土壤颗粒组成与原土壤差异

最大,土壤细颗粒含量较原土壤的多。泥沙细颗粒滞留量随着滞留层深度增大而减小,可用对数函数拟合累积滞留量与滞留层深度之间的关系。

参考文献:

- [1] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.浑水灌溉下泥沙级配土壤水入渗影响的试验研究[J].节水灌溉,2018(11):39-47,50.
- [2] 王锦辉,费良军,聂卫波.浑水灌溉入渗特性研究进展与展望[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):265-270.
- [3] 钟韵,费良军,陈琳,等.浑水膜孔灌多向交汇入渗及减渗特性[J].水土保持学报,2018,32(1):269-273.
- [4] 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.
- [5] Liang X L, Ye Z X, Feng J W, et al. Sediment retention effect of reservoirs and microscale surface depressions[J]. Water Conservation Science and Engineering, 2021(6):153-162.
- [6] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.土壤容重对浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):88-91,96.
- [7] 纪亚男.山东引黄灌区不同灌水定额对田间泥沙入渗规律的影响机理研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2015.
- [8] 张小帅,张耀哲,党永仁,等.泾惠渠灌区浑水泥沙输移特征[J].农业工程学报,2015,31(增刊1):180-187.
- [9] 白瑞,费良军,陈琳,等.含沙率对层状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.
- [10] Zhong Y, Fei L J, Li Y B. Infiltration characteristics of film hole irrigation under the influence of multiple factors[J]. Irrigation and Drainage, 2020,2(1):1-10.
- [11] Jie F L, Fei L J, Zhong Y, et al. Wetting body characteristics and infiltration model of film hole irrigation [J]. Water, 2020,12(1):1-14.
- [12] Fan Y W, Gong J G, Wang Y, et al. Application of philip infiltration model to film hole irrigation[J]. Water Science and Technology Water Supply, 2018,19:978-985.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈琳,费良军,刘利华,等.土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响[J].水土保持学报,2018,32(2):58-66.

- 原旱作小麦农田土壤温室气体的排放特征[J].甘肃农业大学学报,2018,53(6):34-41.
- [10] 左海军,张奇,徐力刚.农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J].环境污染与防治,2008,30(12):83-89.
- [11] 刘威,周剑雄,谢媛圆,等.控释尿素不同条施深度下鲜食玉米产量和氮素利用效应[J].水土保持学报,2018,32(1):246-258.
- [12] 苏志峰,杨文平,杜天庆,等.施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(2):142-153.
- [13] 方日尧,赵惠青,同延安.渭北旱原冬小麦深施肥沟播综合效应研究[J].农业工程学报,2000,16(1):49-52.
- [14] 石岩,于振文,位东斌,等.施肥深度对旱地小麦花后旗叶衰老及产量的影响[J].西北植物学报,1999,19(6):139-142.
- [15] 张永清,李华,苗果园.施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J].土壤,2006,38(1):110-112.
- [16] Holzworth D P, Huth N I, Devoil P G, et al. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. Environmental Modelling and Software,2014,62:327-350.
- [17] 李广,黄高宝,William B,等.APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.
- [18] 李广,黄高宝.基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):342-347.
- [19] 茹晓雅,李广,陈国鹏,等.不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响[J].作物学报,2019,45(11):1725-1734.
- [20] Silva N D, Okada K, Takahashi T. Evaluation of AP-SIM-Wheat to simulate the response of yield and grain protein content to nitrogen application on an Andosol in Japan [J]. Plant Production Science,2021,24(4):454-465.
- [21] Archontoulis S V, Miguez F E, Moore K J. Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States [J]. Agronomy Journal,2014,106(3):1025-1040.
- [22] Luo K Z, Wang E L, Fillery I R P, et al. Modelling soil carbon and nitrogen dynamics using measurable and conceptual soil organic matter pools in APSIM [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2014,186:94-104.
- [23] 汪晓丽,陶玥玥,盛海君,等.硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):129-134.
- [24] 李华伟,司纪升,徐月,等.栽培技术优化对冬小麦根系垂直分布及活性的调控[J].作物学报,2015,41(7):1136-1144.
- [25] 王化岑,刘万代,王晨阳.超高产小麦根系生长规律与垂直分布状态研究[J].中国农学通讯,2002,18(2):6-7.
- (上接第 246 页)
- [16] 董正武,李生字,毛东雷,等.古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包土壤粒度分布特征[J].水土保持学报,2021,35(4):64-72,79.
- [17] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [18] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.浑水膜孔灌入渗影响因素[J].排灌机械工程学报,2017,35(2):178-184.
- [19] 费良军,王锦辉.泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):105-112.
- [20] 阎欣,安慧.宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征[J].应用生态学报,2017,28(10):3243-3250.
- [21] 孙忠超,郭天斗,于露,等.宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分形特征[J].草业学报,2021,30(4):34-45.
- [22] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125.
- [23] 文星跃,黄成敏,黄凤琴,等.岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J].华南师范大学学报(自然科学版),2011,(1):80-86.