

浑水颗粒级配对一维入渗规律及致密层形成特性的影响

康守旋¹, 费良军¹, 钟韵², 刘利华¹, 姜瑞瑞¹

(1.西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,
西安 710048; 2.三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:为探明浑水不同泥沙颗粒级配对入渗规律及致密层形成特性的影响,通过室内土柱垂直入渗试验,选取4种不同物理性黏粒含量的泥沙(5.59%, 9.87%, 18.43%, 39.43%),研究落淤层厚度、湿润锋运移距离、累积入渗量随入渗时间变化特征,并测定落淤层和入渗结束后不同深度(0—1, 1—2 cm土层)土壤的颗粒级配。结果表明:浑水泥沙中物理性黏粒含量越大,落淤层厚度越大;同一入渗时刻湿润锋运移距离和单位面积累积入渗量随物理性黏粒含量的增大而减小。落淤层厚度随时间变化符合幂函数关系($R^2 > 0.9$),拟合系数随着物理性黏粒含量的增大而减小,而拟合参数在0.50上下变化。不同物理性黏粒含量下落淤层与入渗泥沙颗粒组成相似,2 cm入渗深度处土壤颗粒组成与原土壤类似;1 cm入渗深度处土壤 < 2 mm细颗粒含量较原土壤变大,随着物理性黏粒含量的变大,各处理分别增加4.29%, 4.92%, 7.96%及16.30%。研究结果可为进一步探究浑水入渗形成致密层特性提供理论依据。

关键词:浑水; 颗粒级配; 入渗; 致密层

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0222-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.030

Effects of Muddy Water Particle Gradation on One-dimensional Infiltration Law and Characteristics of Tight Layer Formation

KANG Shouxuan¹, FEI Liangjun¹, ZHONG Yun², LIU Lihua¹, JIANG Ruirui¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;
2. Water Conservancy and Environmental Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002)

Abstract: In order to explore the influence of different particle gradations in muddy water on the infiltration law and formation characteristics of tight layer, indoor vertical infiltration experiments of soil pillars were conducted. In this study, four types of sediment with different physical clay content (5.59%, 9.87%, 18.43% and 39.43%) were selected and the variation characteristics of the thickness of the falling silt layer, the wet front migration distance and the cumulative infiltration volume with the infiltration time were studied, and the gradation of soil particles in the falling silt layer and the different depths after the infiltration (0—1 cm, 1—2 cm) were measured. The results showed that the greater the content of physical clay in the muddy cement sand was, the greater the thickness of the falling silt layer was. At the same infiltration time, the migration distance of the wet front and the cumulative infiltration amount per unit area decreased with the increasing of the physical clay content. The variation of the falling silt layer thickness with time conformed to the power function relationship ($R^2 > 0.9$), and the fitting coefficient decreased with the increasing of the physical clay content, and the fitting parameter changed around 0.5. Under different physical clay contents, the particle composition of the silt layer was similar to that of infiltration sediment. The particle composition of soil at 2 cm infiltration depth was similar to that of the original soil. The content of fine particles < 2 mm in the soil at 1 cm infiltration depth increased compared with the original soil. With the increasing of physical clay content, the contents of fine particles < 2 mm increased by 4.29%, 4.92%, 7.96% and 16.30% in different treatments, respectively. The research results could provide a theoretical basis for further exploring the characteristics of dense layers formed by muddy water infiltration.

收稿日期: 2021-06-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(52079105, 51779205)

第一作者: 康守旋(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: kangsx2824@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

Keywords: muddywater; particle gradation; infiltration; tight layer

我国黄河流域大部分区域处于干旱半干旱地区,该气候类型下降雨量较少,农业灌溉用水严重不足^[1],而黄河在流经黄土高原时,由于黄土高原植被覆盖率低,地形千沟万壑,极易遭受侵蚀破坏,再加上年内降雨分布以暴雨形式为主^[2],因此黄土高原水土流失现象十分严重,黄河也成为世界上含沙量最高的河流^[3]。为解决农业用水问题,黄河流域一些灌区结合自身流域特点及生产实际,引浑水对灌区内农田进行灌溉。

浑水在灌溉过程中,浑水泥沙随水流推进、运移,形成不同于清水的田间水流推进过程及土壤水分入渗规律,因此已有不少学者^[4-7]对浑水灌溉进行了研究。在浑水入渗特性方面,已有学者对浑水含沙率、泥沙颗粒级配^[8]、入渗土壤容重^[9]等对浑水一维入渗产生的影响进行研究,卞艳丽等^[8]通过开展浑水测坑入渗试验发现,随着泥沙颗粒变细,浑水入渗量和入渗率逐渐减小,并利用 Kostiakov 公式对入渗过程进行拟合,得出影响浑水入渗特性的关键因素为粒径 $<0.01\text{ mm}$ 的泥沙含量值;在浑水波涌灌^[10]、浑水膜孔灌^[11-16]等方面也取得一定的成果;费良军等^[17]研究了浑水波涌灌连续入渗和间歇入渗特性发现,浑水累积入渗量随时间变化也符合 Kostikov 公式,间歇入渗相较于浑水连续入渗有更明显的阻渗效果;在浑水膜孔灌方面目前研究膜孔灌自由入渗^[18]、交汇入渗^[19]等,刘利华等^[20]开展膜孔灌室内浑水肥液入渗试验,研究了湿润体内氮素分布得出,湿润体内 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量均随入渗浑水含沙率的增大而减小, NO_3^--N 和 NH_4^+-N 分别集中分布在湿润半径 10 cm 和 5 cm 范围内。除此之外,学者们对浑水减渗机理^[21-23]及浑水入渗数学模型^[24-25]进行了研究,但对浑水入渗时形成的致密层鲜有研究。

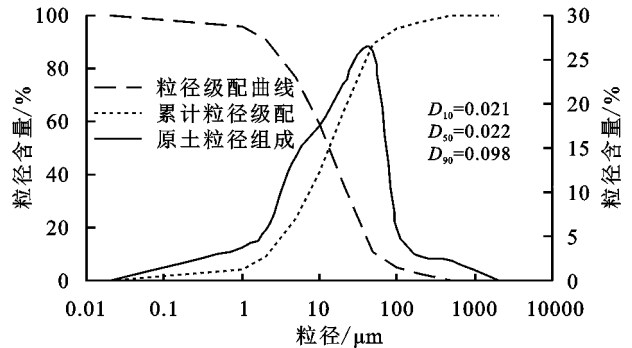
土壤致密层又称为土壤物理结皮,按成因不同又可分为结构结皮和沉积结皮^[26]。本文主要研究浑水入渗时泥沙形成的致密层。进入农田的在浑水入渗时,部分泥沙颗粒随水分运移进入土壤中,滞留在土层内,形成滞留层,而浑水中大部分泥沙颗粒逐渐沉积在土壤表面,形成落淤层。无论是落淤层还是滞留层均对入渗产生影响,均为致密层的一部分。本文结合已有研究,通过室内浑水一维入渗试验,研究不同泥沙颗粒级配对致密层形成的影响及对浑水入渗规律的影响,以期为更深入探究浑水入渗提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究供试土壤取自西安市灞桥区农田表层,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)测定,测定结果见图 1,其中粒径在 $d\leq 0.002\text{ mm}$, $0.002\text{ mm}<d\leq 0.02\text{ mm}$, $0.02\text{ mm}<d\leq 2\text{ mm}$ 分别占 9.46% , 53.66% , 36.88% ,土壤类型为粉壤土(国际制土壤质地分类标准),物理性黏粒含量为 40.96% ,初始含水量为 2.67% ,饱和导水率为 0.01 cm/min 。



注: D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为小于累积百分含量 10% 、 50% 、 90% 对应的粒径(mm)。

图 1 土壤颗粒组成

试验入渗浑水中所含泥沙取自泾惠渠灌区干渠,取回泥沙经风干后过 1 mm 筛,人工配置出不同颗粒组成的 4 种泥沙。采用 Mastersizers-2000 型激光粒度分析仪测定各组泥沙颗粒组成,测定结果见表 1。

1.2 试验设计

为探究泥沙颗粒级配对浑水入渗的影响,采用含沙率为 6% 的浑水进行入渗试验,试验共设置 4 个不同水平的物理性黏粒含量(表 1),分别为 5.59% , 9.87% , 18.43% , 39.43% (分别对应为 T1、T2、T3、T4 处理)。

表 1 供试泥沙颗粒组成 单位: %

处理	黏粒 ($<0.02\text{ mm}$)	粉粒 ($0.02\sim 0.2\text{ mm}$)	砂粒 ($0.2\sim 2\text{ mm}$)	物理性 黏粒 $d_{0.01}$
T1	2.59	8.25	89.17	5.59
T2	2.89	14.82	82.30	9.87
T3	6.38	34.18	59.45	18.43
T4	13.22	56.97	29.80	39.43

注:泥沙颗粒组成含量为体积含量。

1.3 试验装置与方法

试验于 2020 年 7 月在西安理工大学农水试验大厅进行。浑水一维垂直入渗装置由土柱和浑水马氏瓶 2 部分组成(图 2)。浑水马氏瓶由 2 个 60-KTYZ 型电动机、传动轴、叶片和有机玻璃圆筒制成,使用时电动机以固定转速(60 r/min)通过转轴带动叶片转动,以此搅动马氏瓶内含有泥沙的浑水,避免泥沙发生沉积,从而使浑水中的泥沙入渗的浑水保持在恒定的含沙率。土柱直径为 8 cm 、高为 40 cm 、壁厚为 5

mm,由有机玻璃圆筒制成,底部开有通气孔,因此不考虑禁锢空气压力。

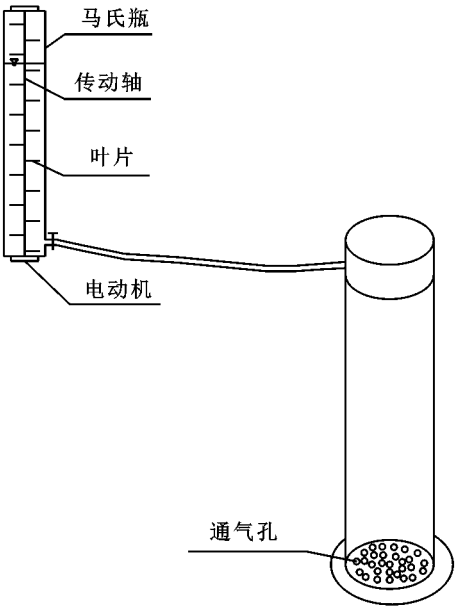


图 2 浑水一维入渗装置示意

试验前采用烘干法测定土壤初始含水率,并按预定方案中土壤容重计算称取分层(5 cm)土壤。将称取好的土壤均匀装入土柱中,再用夯实工具夯至预定高度。装土过程中土体表面刮毛后再继续装土,防止土体出现分层现象。装土结束后,静置 24 h 后进行入渗试验。入渗时调整浑水马氏瓶和土柱的位置,以保证马氏瓶可以稳定而连续供水。入渗过程中,按照先密后疏的时间间隔记录不同入渗时刻马氏瓶水位读数,同时记录对应的湿润锋位置。土柱表面划有刻痕,将土柱表土处的刻痕做为表土“本体”和落淤层“客体”的分界线;入渗开始后,按照先密后疏的时间间隔测量刻痕至落淤层表面的距离(即为落淤层厚度)。入渗结束后,使用土钻取土(间隔为 1 cm),并测定土样土壤含水率和颗粒组成。

2 结果与分析

2.1 泥沙颗粒级配对致密层的影响

2.1.1 泥沙颗粒级配对落淤层厚度的影响 落淤层是由浑水入渗时泥沙颗粒逐渐沉积在土壤表面而形成的。由图 3 可知,随着入渗的进行,不同处理落淤层厚度逐渐增大;落淤层厚度随物理性黏粒含量的增大而减小。在入渗前期,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并最终趋于稳定。这是因为在入渗前期,泥沙中的细颗粒随入渗水分进入土体孔隙中。物理性黏粒含量越大,在入渗过程中进入土体的细颗粒也将增加。因此,物理性黏粒含量越大,形成的落淤层厚度越小。另外,在入渗 100 min 之后,落淤层厚度增加速率随物理性黏粒含

量变化不明显,此时细颗粒逐渐停止进入土体,因此物理性黏粒对落淤层厚度影响不明显。

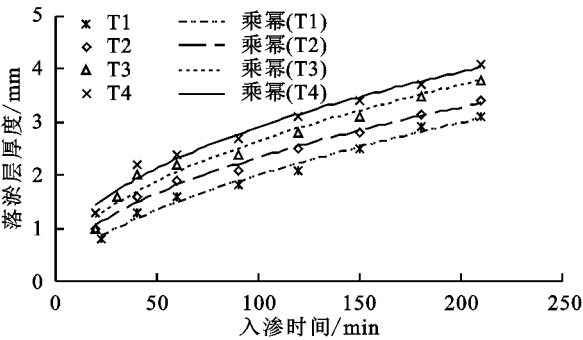


图 3 落淤层厚度随入渗时间变化曲线

落淤层厚度随时间变化曲线符合幂函数关系,幂函数公式为:

$$H=at^b \tag{1}$$

式中: H 为落淤层厚度(mm); a 为拟合系数; b 为拟合参数。

利用公式(1)对落淤层厚度和入渗时间进行拟合,拟合结果见表 2。由表 2 可知,拟合决定系数 R^2 均大于 0.95,说明拟合结果较好,建立的模型相关关系显著,拟合系数 a 随着物理性黏粒的增大而增大,而拟合参数 b 随着物理性黏粒增大而减小。分析得出,拟合系数 a 与物理性黏粒 $d_{0.01}$ 之间呈良好的线性函数关系,拟合参数 b 与物理性黏粒 $d_{0.01}$ 之间呈良好的指数函数关系:

$$a=0.0061d_{0.01}+0.1480,R^2=0.984\ 4 \tag{2}$$

$$b=0.5578e^{0.006d_{0.01}},\quad R^2=0.938\ 3 \tag{3}$$

式中: $d_{0.01}$ 为物理性黏粒含量(%)。

将公式(2)和公式(3)拟合结果代入公式(1)中即可得到以物理性黏粒 $d_{0.01}$ 和入渗历时为自变量的浑水一维垂直入渗的落淤层厚度计算模型,即:

$$H=(0.0061d_{0.01}+0.1480)t^{0.5578e^{0.006d_{0.01}}} \tag{4}$$

表 2 落淤层厚度与入渗时间拟合参数

处理	拟合系数 a	拟合系数 b	决定系数 R^2
T1	0.1416	0.5758	0.9820
T2	0.2402	0.4936	0.9873
T3	0.2811	0.4869	0.9535
T4	0.3765	0.4438	0.9701

2.1.2 泥沙颗粒级配对致密层颗粒组成的影响 由表 3 可知,入渗结束后,不同物理性黏粒含量下落淤层细颗粒相对含量均低于浑水泥沙,粗颗粒相对含量均增大。这是因为浑水在入渗过程中存在滞留现象;在入渗过程,浑水中的部分细颗粒进入入渗土体,落淤层由剩余的泥沙颗粒沉积而形成。随着泥沙物理性黏粒含量的增大,落淤层 <2 mm 的细颗粒变化量逐渐增大。以浑水泥沙粒径组成为对照,T1、T2、T3、T4 处理变化量分别为-1.76%,-3.25%,-4.25%,-6.38%。不同处理,落淤层物理性黏粒含量均小于对应入渗泥沙,随着

物理性黏粒含量的增大,T1、T2、T3、T4 处理减小量分别为 2.90%,10.44%,13.67%,14.72%。

浑水入渗过程中,部分泥沙颗粒随水分运移进入土壤中,滞留在土层内,改变土壤结构而形成滞留层。从表 3 可知,0—1 cm 处土壤颗粒组成含量较原土有明显变化,不同物理性黏粒含量下<2 mm 细颗粒相对含量均高于原土;随着物理性黏粒含量的增加,T1、T2、T3、T4 处理分别为 65.83%,66.22%,68.14%及 73.41%(原土中<2 mm 的细颗粒含量为 63.12%),依次增幅为 4.29%,4.92%,7.96%及 16.30%。各处理在入渗深度为 1—2 cm 处土壤颗粒组成<2 mm 的细颗粒含量随物理性黏粒含量增大幅度不明显,但均略大于原土中含量,T1、T2、T3、T4 处理分别为 63.52%,64.18%,64.79%,65.21%;各处理在土层深度为 1—2 cm 处其他颗粒含量较原土变化较小。

T1、T2、T3、T4 处理物理性黏粒含量在 0—1 cm 土层深度变化明显,分别为 42.85%,46.13%,48.09%及 50.77%,较原土中增大 4.61%,12.62%,17.41%,23.94%(原土中物理性黏粒含量为 40.96%)。说明物理性黏粒含量越大,在入渗过程中泥沙进入土壤中的细颗粒随之增大。1—2 cm 土层深度处,物理性黏粒含量依次为 41.33%,41.94%,42.40%及 42.87%,略大于原土中的含量。泥沙细颗粒通过入渗进入土体后,其主要分布在 0—1 cm 深度以上的土体中,1—2 cm 土层深度处土壤颗粒受泥沙细颗粒影响较小,因此从表土到入渗深度 2 cm 均为滞留层,从落淤层和滞留层均为浑水入渗形成的致密层。

表 3 各处理不同入渗深度颗粒分析结果				
颗粒分 土壤	<0.02 mm/%	0.02~0.2 mm/%	0.2~2 mm/%	物理性黏粒 $d_{0.01}/\%$
泥沙	T1	10.84	86.96	2.31
	T2	17.71	79.76	2.54
	T3	40.56	57.31	2.13
	T4	70.20	28.56	1.24
落淤层	T1	10.76	87.05	2.19
	T2	16.89	80.58	2.53
	T3	39.24	58.63	2.13
	T4	65.72	33.03	1.25
原土		63.12	34.53	2.35
0—1 cm	T1	65.83	31.86	2.35
	T2	66.22	31.52	2.35
	T3	68.15	29.66	2.34
	T4	73.41	24.44	2.35
1—2 cm	T1	63.52	34.11	2.37
	T2	64.18	33.40	2.42
	T3	64.79	32.76	2.45
	T4	65.21	32.27	2.52

2.2 泥沙颗粒级配对入渗特性的影响

2.2.1 泥沙颗粒级配对湿润锋运移的影响 由图 4 可知,随着入渗时间的推移,不同物理性黏粒含量对应的湿润锋均不断向下运移,且各处理运移速率呈逐渐减小趋势;在同一入渗时间内,湿润锋运移距离随物理性黏粒含量的增大而减小;入渗结束时,T1、T2、T3、T4 处理湿润锋运移距离分别为 21.89,18.93,17.00,15.60 cm,相较于 T1 处理,T2、T3、T4 分别减小 15.64%,25.83%,33.23%,可以看出物理性黏粒含量对湿润锋运移距离有一定的影响。

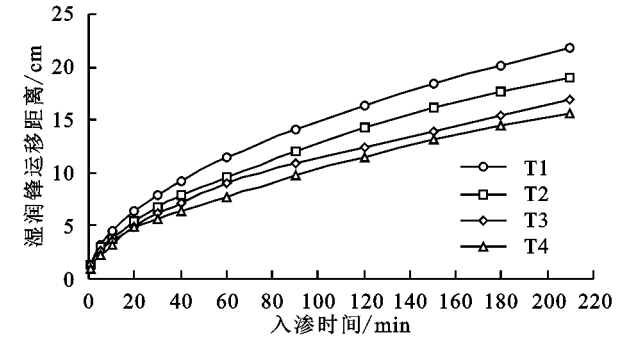


图 4 湿润锋随入渗时间变化曲线

试验研究发现,不同物理性黏粒含量下湿润锋运移距离与入渗时间的变化过程符合幂函数关系,利用公式(5)对图 4 中的数据进行拟合,拟合结果见表 4。

$$Z = pt^q \tag{5}$$

式中:Z 为湿润锋运移距离(cm);p、q 分别为湿润锋拟合系数、湿润锋拟合参数。

由表 4 可知,不同物理性黏粒含量下湿润锋运移距离与入渗时间拟合的决定系数均>0.99,表明拟合结果良好。在表 4 中,物理性黏粒含量由 5.59%增大至 39.43%,湿润锋拟合系数 p、湿润锋拟合参数 q 均随着物理性黏粒含量的增大而减小,湿润锋拟合系数 p 从 1.355 2 减小至 1.004 1,而湿润锋拟合参数 q 在 0.50 上下变化。

表 4 湿润锋与入渗时间拟合参数

处理	湿润锋 拟合系数 p	湿润锋 拟合参数 q	决定 系数 R ²
T1	1.3552	0.5208	0.9973
T2	1.2500	0.5046	0.9965
T3	1.2331	0.4831	0.9983
T4	1.0041	0.4795	0.9991

经分析发现,湿润锋拟合系数 p 与物理性黏粒 $d_{0.01}$ 之间符合线性函数关系,按照线性函数关系对拟合系数 p 与物理性黏粒 $d_{0.01}$ 进行拟合得:

$$p = -0.0096 d_{0.01} + 1.3874, R^2 = 0.956 5 \tag{6}$$

公式(6)拟合决定系数 $R^2 > 0.9$,说明利用线性函数对湿润锋拟合系数 p 与物理性黏粒 $d_{0.01}$ 之间的效果较好。将公式(6)代入公式(5)可得到物理性黏粒 $d_{0.01}$ 下湿润锋 Z 随入渗时间 t 的关系模型,即:

$$Z = (-0.0096 d_{0.01} + 1.3874) t^{0.50} \tag{7}$$

2.2.2 泥沙颗粒级配对单位面积累积入渗量的影响

从图 5 可以看出,不同物理性黏粒含量下单位面积累积入渗量均随入渗时间的增大而增大,且累积入渗量增加量随入渗进行逐渐减小;相同入渗时间内,各处理累积入渗量大小依次为 T1>T2>T3>T4,入渗结束时累积入渗量由 7.51 cm 减少至 5.22 cm。说明物理性黏粒含量对单位面积累积入渗量有一定影响,在相同入渗时间内,单位面积累积入渗量随物理性黏粒含量的增大而减小。

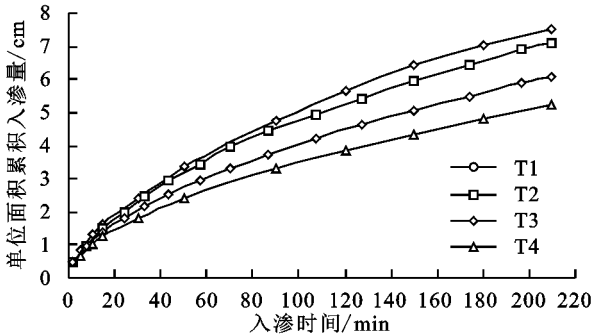


图 5 累积入渗量随时间变化曲线

试验研究得出,单位面积累积入渗量随入渗时间变化符合 Kostikov 入渗模型为:

$$I = K t^{\alpha} \tag{8}$$

式中: I 为单位面积累积入渗量 (cm); t 为入渗时间 (min); K 、 α 分别为入渗量拟合系数、入渗拟合参数。

由表 5 可知,各处理拟合结果的决定系数均大于 0.95,说明 Kostikov 入渗模型可以较好地模拟不同物理性黏粒含量下浑水一维垂直入渗单位面积累积入渗量随入渗时间变化过程。在 Kostikov 入渗模型的拟合结果中,入渗拟合系数 K 及入渗拟合参数 α 随物理性黏粒含量的增大而减小,物理性黏粒含量由 5.59% 增大至 39.43% 时, Kostikov 入渗模型中入渗拟合系数 K 从 0.327 6 减小至 0.288 1,入渗拟合参数 α 从 0.591 7 减小至 0.532 2。

表 5 Kostikov 模型入渗拟合参数

处理	入渗拟合系数 K	入渗拟合参数 α	决定系数 R^2
T1	0.3276	0.5917	0.9994
T2	0.3128	0.5555	0.9965
T3	0.3016	0.5417	0.9953
T4	0.2881	0.5322	0.9865

3 讨论

利用浑水灌溉是一些引黄灌区结合自身流域特点及生产实际有效解决农业灌溉用水而采用的措施之一。本研究主要研究了浑水一维垂直入渗条件下,不同浑水泥沙颗粒级配对入渗规律及致密层形成特性的影响。在浑水一维垂直入渗下,泥沙颗粒级配对

致密层中落淤层厚度变化有显著影响。本研究表明,落淤层厚度随浑水中物理性黏粒含量的增大而减小;在入渗前期,落淤层厚度增大较快,随着入渗的进行,厚度增大速率逐渐变小并最终趋于稳定。在入渗前期,泥沙中的细颗粒随入渗水分进入土体孔隙中。物理性黏粒含量越大,在入渗过程中进入土体的细颗粒也将增加。随着入渗的进行,进入土壤的细颗粒越来越多,逐渐填充土壤孔隙而堵塞了细颗粒继续进入的通道,并起到一定的阻渗作用。因此入渗后期落淤层厚度增大速率随物理性黏粒含量变化不明显,说明此时细颗粒逐渐停止进入土体。滞留层内 0—1 cm 处 <2 mm 细颗粒相对含量和物理性黏粒含量随着物理性黏粒含量的增加,1—2 cm 处 2 种土壤颗粒含量略大于原土中含量,说明泥沙细颗粒通过入渗进入土体后,主要分布在 1 cm 深度以上的土体中,2 cm 土层深度处土壤颗粒受泥沙细颗粒影响较小,因此从表土到入渗深度 2 cm 为滞留层,从落淤层和滞留层均为浑水入渗形成的致密层。

浑水泥沙颗粒组成是影响浑水入渗的关键因素^[4]。本研究发现,不同浑水颗粒级配处理的一维垂直入渗均符合 Kostikov 入渗模型,入渗初期的累积入渗量差异较小,随着入渗的进行,入渗量相差越来越大,入渗结束时累积入渗量由 7.51 cm 减少至 5.22 cm。浑水所含泥沙颗粒组成不同,在入渗过程中形成了不同厚度、颗粒级配的落淤层及不同颗粒级配的滞留层,因此对入渗结果产生了不同的影响。随着浑水中物理性黏粒含量的增大,单位累积入渗量逐渐减小,与姜瑞瑞等^[27]研究结果一致。本研究通过一维垂直入渗试验,针对浑水入渗条件下 4 种不同浑水颗粒级配对致密层形成过程和水分入渗过程的影响进行分析,重点研究了浑水颗粒级配对入渗规律和致密层特性的影响,主要对致密层中落淤层厚度、落淤层和滞留层颗粒级配及入渗过程中累积入渗量进行定量分析;对致密层形成及入渗过程的研究,作为基础性研究结论可为后续浑水入渗提供理论依据和技术支撑。研究得出的落淤层厚度、湿润锋运移距离及累积入渗量的函数关系拟合效果良好,但均为西安粉壤土在特定试验条件得出的经验模型,适用性不强。因此,建立浑水泥沙颗粒组成、浑水含沙率和土壤质地等多因素模型以及相关的机理性分析亟待进一步深入研究。

4 结论

(1)同一入渗时刻,落淤层厚度随物理性黏粒含量的增大而减小;落淤层厚度随入渗历时变化符合幂函数关系,拟合系数 α 随着物理性黏粒含量的增大

而增大,而拟合参数 b 随着物理性黏粒含量增大而减小;建立了含有落淤层厚度 H 与入渗时间 t 和浑水泥沙物理性黏粒 $d_{0.01}$ 的经验模型。

(2)在不同物理性黏粒含量下,落淤层与入渗泥沙颗粒组成相似;物理性黏粒含量越大,落淤层中 $<2\text{ mm}$ 的颗粒和物理性黏粒含量减小量越来越大;随着物理性黏粒含量的增大,在 1 cm 入渗深度处 $<2\text{ mm}$ 细颗粒和物理性黏粒含量逐渐增大; 2 cm 入渗深度处土壤颗粒组成与原土壤类似。

(3)浑水泥沙中物理性黏粒含量越大,相同入渗历时湿润峰运移距离越小;湿润锋与入渗时间呈良好的幂函数关系,湿润锋拟合系数 p 随物理性黏粒 $d_{0.01}$ 的增大而不断减小,其中拟合参数 q 在 0.50 上下变化;建立了湿润锋运移距离与入渗时间和物理性黏粒 $d_{0.01}$ 的经验模型。

(4)同一入渗时刻,单位面积累积入渗量随物理性黏粒含量的增大而逐渐减小。Kostiakov 入渗模型可较好的模拟累积入渗量与入渗时间的关系,物理性黏粒含量越大,Kostiakov 入渗模型中入渗拟合系数 K 和入渗拟合参数 α 均减小。

参考文献:

[1] 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.

[2] 罗琳,王忠静,刘晓燕,等.黄河流域中游典型支流汛期降雨特性变化分析[J].水利学报,2013,44(7):848-855.

[3] Ran Q H, Zong X Y, Ye S, et al. Dominant mechanism for annual maximum flood and sediment events generation in the Yellow River basin[J].Catena,2020,187(3):34-45.

[4] 姚欣.尊村引黄灌区管渠灌溉水分分布研究[D].山西运城:中国农业科学院,2017.

[5] 白丹,李占斌,洪小康,等.浑水入渗规律试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999(1):60-63.

[6] 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.

[7] 王延贵,胡春宏,周宗军.引黄灌区泥沙远距离分散配置模式及其评价指标[J].水利学报,2010,41(7):764-770.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 费良军,王文焰.浑水波涌畦灌田面综合糙率系数研究

[J].水利学报,1998(增刊 1):126-129.

[11] 康守旋,费良军,姜瑞瑞,等.肥液浓度对浑水膜孔灌多点源入渗水氮运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):156-161.

[12] 刘乐.浑水膜孔灌自由入渗氮素运移转化与水肥耦合特性及影响因素研究[D].西安:西安理工大学,2019.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Fan Y W, Shao X X, Gong J G, et al. An empirical model for estimating soil wetting pattern dimensions during film hole irrigation[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2020,66(13):1765-1779.

[16] Zhong Y, Fei L J, Li Y B. Infiltration characteristics of film hole irrigation under the influence of multiple factors [J].Irrigation and Drainage,2020,69(3):417-426.

[17] 费良军,王文焰.浑水波涌畦灌条件下的间歇入渗试验研究[J].水利学报,1998(5):66-71.

[18] 刘利华,费良军,朱红艳,等.含沙率对浑水膜孔灌单孔自由入渗特性的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):62-67.

[19] 周文,曹琳,王锦辉.浑水膜孔灌单向交汇入渗特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(7):627-633.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 王全九,邵明安,汪志荣,等.Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999(4):66-70.

[23] 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):135-138.

[24] 王文焰,费良军,汪志荣,等.浑水波涌灌溉的节水机理与效果[J].水利学报,2001,32(5):5-10,16.

[25] 费良军,王文焰.浑水间歇入渗模型研究[J].水利学报,1999,30(2):41-44.

[26] 路培.土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[27] 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.