

含沙率对层状土浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响

白瑞, 费良军, 陈琳, 钟韵

(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: 为探究不同浑水含沙率对层状土入渗特性的影响, 通过室内膜孔灌自由入渗试验, 研究了以夹砂层位置为 5~10 cm 的层状土条件下清水和不同含沙率的浑水(2%, 5%, 7%, 9%)入渗的累积入渗量、湿润锋运移规律以及湿润体内土壤含水量分布情况, 分别建立了层状土不同含沙率浑水膜孔灌入渗量、湿润锋运移距离与入渗时间之间的关系; 提出了基于清水入渗的不同浑水含沙率单位膜孔面积累积入渗量模型。结果表明: 不同浑水含沙率累积入渗量变化趋势一致, 但含沙率越大, 累积入渗量越小, 浑水减渗作用越明显, 对应入渗系数越小, 入渗指数越大; 湿润锋运移距离随含沙率的增大而减小, 当水分入渗到壤—砂交界面时, 湿润锋在垂向上出现明显停滞, 仅在水平方向上随入渗时间不断推进; 供水结束后不同浑水含沙率下土壤湿润体内水分主要集中在砂层以上, 土壤含水量随浑水含沙率的增大而减小。研究结果可为进一步研究层状土浑水膜孔灌灌溉技术提供理论参考。

关键词: 含沙率; 层状土; 浑水膜孔灌; 减渗作用; 阻渗

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0043-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.007

Effect of Sediment Concentration on Single Point Source Free Infiltration Characteristics of Muddy Water in Layered Soil with Film Hole Irrigation

BAI Rui, FEI Liangjun, CHEN Lin, ZHONG Yun

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to explore the effect of different sediment concentrations on infiltration characteristics of muddy water in layered soil, using the indoor free infiltration test of film hole irrigation, the cumulative infiltration, the wetting front migration law and the distribution of soil water in the wet body of clear water and different sediment concentrations (2%, 5%, 7% and 9%) of muddy water in layered soil with 5—10 cm sand layer were studied. The relationships of the cumulative infiltration volume, the wetting front migration distance and the infiltration time were established. The cumulative infiltration volume model of per unit film hole area under different muddy water sediment concentrations was proposed based on clear water infiltration. The results showed that there was a consistent trend for the cumulative infiltration under different sediment concentrations. The larger the sediment concentration was, the smaller the cumulative infiltration was, resulting in the more obvious of infiltration reduction force with muddy water. The smaller the infiltration coefficient was, the larger the infiltration index was. The wetting front migration distance decreased with the increasing of sediment concentrations. When the water infiltrated into the loam-sand interface, the wetting front had a significant stagnation in the vertical direction, which advanced with the infiltration time only in the horizontal direction. The soil moisture in the wet body mainly concentrated above the sand layer, and the soil water contents decreased with the increase of the muddy water sediment concentrations. These results could provide a theoretical reference for further research of muddy water film hole irrigation technology in layered soil.

Keywords: sediment concentration; layered soil; muddy water film hole irrigation; infiltration reduction force; prevent infiltration

收稿日期: 2019-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(51779205, 51479161); 陕西省水利科技项目(2014slkj-02)

第一作者: 白瑞(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: 963642685@qq.com

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

黄土高原地处干旱半干旱地区,受降雨侵蚀影响,水土流失及土地退化问题日益严重,加之旱季缺水问题,因此水分成为限制黄土高原地区植被恢复及作物生长的重要因素^[1-2]。因此采用高效的节水灌溉技术是黄土高原地区农业生产应对水资源短缺的必然选择。

膜孔灌是在膜上灌的基础上发展的利用专门灌水孔进行灌水的新型地面灌溉技术,具有保温、保墒、节水、增产等优点^[3]。目前,国内外学者关于膜孔灌进行了大量研究^[4-9],并结合我国黄河流域典型的浑水灌溉特点,探究了浑水膜孔灌的入渗特性。但以上研究均建立在均质土的基础上,仅有刘文光等^[10]基于室内试验,对夹砂层土壤清水膜孔灌入渗特性进行了数值模拟。

由于自然界中的土壤大多以层状结构存在,其剖面复杂多变^[11],不同的剖面结构使得其水分入渗特性与均质土壤存在明显差异。根据土壤质地的不同,层状土壤可分为上轻下重和上重下轻 2 种。目前,国内外对层状土水分入渗特性已开展了很多研究,如国外 Colman 等^[12]早在 1945 年研究发现,层状土层序排列无论上粗下细或上细下粗,土壤均可近似为均质土入渗,且入渗过程主要由细质土控制;Hill 等^[13]研究发现,若细砂覆盖粗砂,土壤湿润锋可能出现指流现象,同时入渗率变为常数;国内张建丰等^[14]、王文焰等^[15]在上述研究基础上通过大量试验分析了指流发生的条件及形成机理,结果表明夹砂层的设置具有良好的阻水性和减渗性,使湿润锋在层状界面停滞运

移,入渗曲线由非线性转为线性;李毅等^[16]通过研究不同夹层位置与厚度的层状土入渗特性,发现夹砂层位置越靠上,对应累积入渗量越小;吉恒莹等^[17]进行了 4 种不同水质作用于 2 种不同土壤构型的入渗研究,表明水质对入渗时间及入渗率具有显著影响;任利东等^[2]通过对不同类型土壤的持水能力进行研究,结果表明层状土柱上层土壤持水能力在一定范围内随分层厚度的减小而增加。由此可见,不同因素对层状土入渗特性、湿润锋运移以及土壤含水量分布均有不同程度的影响。

基于以上研究进展发现,目前对于层状土浑水膜孔灌方面的研究还未涉及。由于浑水中含有泥沙使入渗特性与清水有明显区别^[18],而影响浑水入渗特性的根本原因为浑水中含沙量和泥沙级配^[19]。因此,本文在先前研究的基础上,开展不同含沙率对层状土浑水膜孔灌入渗特性的影响,为进一步掌控和改善黄土高原地区的用水模式提供参考,同时也为指导实际灌溉生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤分 2 种,其中粉壤土取自西安洪庆镇农田,去除杂草后带回实验室风干后碾碎过 2 mm 筛;砂土取自宁夏吴忠市,取回后风干过 1 mm 筛备用。采用 Mastersizer—2000 型激光粒度分析仪测定 2 种土壤颗粒,土壤基本特性见表 1。

表 1 供试土壤颗粒组成

土壤质地 类型	颗粒含量(体积分数)/%			初始 含水率/%	饱和 含水率/%	饱和导水率/ (cm·min ⁻¹)	pH
	砂粒	粉粒	黏粒				
	(0.02~2 mm)	(0.002~0.02 mm)	(<0.002 mm)				
粉壤土	14.87	71.55	13.58	2.93	38.26	0.0177	7.50
砂土	87.20	10.50	2.30	1.84	36.59	0.2013	9.15

1.2 材料与方法

试验于 2019 年 1 月在西安理工大学农水试验大厅进行。膜孔灌室内入渗装置由土箱和马氏瓶 2 部分组成,试验土箱规格为 24 cm×20 cm×30 cm,采用厚度为 10 mm 有机玻璃制成,底部设有排气孔以消除禁锢空气的影响。装土顺序按照壤土+砂土+壤土排列,其中砂土作为夹层装土高度为 5—10 cm 土层。设置壤土容重 1.35 g/cm³、砂土容重 1.50 g/cm³ 分层装土,每层高度为 5 cm,层间打毛,防止出现分层现象,装土高度共为 25 cm。装土结束后将直径为 8 cm、高 5 cm 的 1/4 膜室牢贴于土箱一角,入渗水头控制为恒定 5 cm。试验供水装置采用改进的内径为 9 cm、高为 90 cm 的马氏瓶持续供水,马氏瓶中配有电动搅拌装置,转动轴上带有叶片(转动轴直径为 1.4 cm,误差忽略不计),可持续搅拌浑水中的

泥沙沉淀,试验装置见图 1。浑水泥沙取自陕西泾惠渠,风干后过 1 mm 筛,配置成不同含沙率的浑水,试验设置浑水含沙率 0.2%,5%,7% 和 9% 5 个水平,每个水平设置 3 次重复。入渗过程中按照先密后疏的原则记录每一时刻对应的入渗量与湿润锋,入渗 360 min 后停止供水,立即用吸耳球吸出 1/4 膜室水头积水,采用土钻在湿润体水平与垂直方向不同位置处进行取土,并采用烘干法测定土壤含水率,为后续土壤湿润体内含水率分析提供依据。

2 结果与分析

2.1 不同含沙率浑水膜孔灌层状土累积入渗量变化

从图 2 可以看出,不同浑水含沙率对应累积入渗量均随时间的增大而增大;入渗结束后,含沙率为 0(清水),2%,5%,7%,9% 的单位膜孔累积入渗量分别为 70.00,51.25,39.00,32.85,26.70 cm,说明浑水含沙率越

大,对应累积入渗量越小,相比清水入渗存在减渗作用,以清水入渗单位膜孔累积入渗量作为基数,利用减渗率^[1]表示浑水的减渗效果,入渗结束后,浑水含沙率为 2%,5%,7%,9% 对应减渗率分别为 31.53%,47.30%,54.12% 和 60.95%。可见,随着浑水含沙率的增加,减渗率逐渐增大,减渗效果越明显。

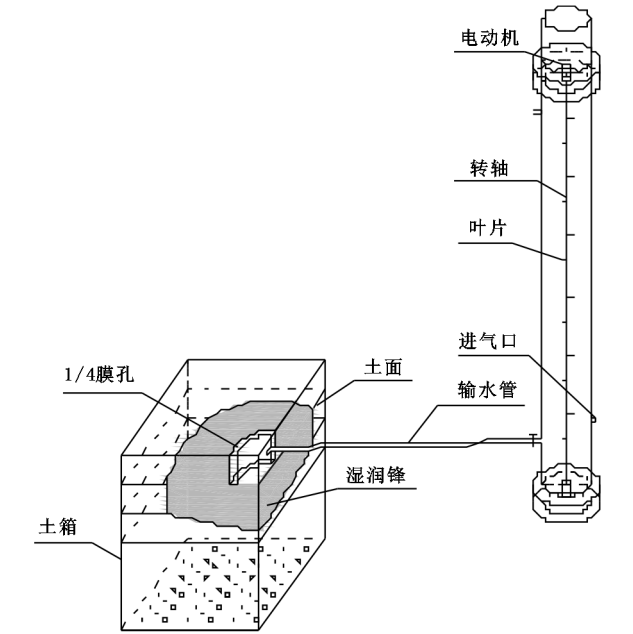


图 1 单点源浑水膜孔灌试验装置

从图 3 可以看出,不同浑水含沙率对应入渗率均随入渗时间的增加不断减小,最终趋于稳定,即稳定入渗率,其为表征土壤后期入渗能力的重要指标^[17]。稳定入渗率随含沙率的增大不断减小,相比于清水 0.2 cm/min 的稳定入渗率,含沙率为 2%,5%,7%,9% 的浑水稳定入渗率分别为减小 30%,45%,55% 和 65%。其原因是由于在入渗过程中浑水中较大的泥沙颗粒首先在膜孔中心处的土壤表面发生落淤,逐渐形成沉积层,同时浑水含沙率越大,沉积层形成越快,厚度越大;其次,浑水中的细小泥沙在入渗过程中随水分穿过沉积层进入土壤,对土体内孔隙进行填充,随着入渗时间的增加,进入土体的泥沙越多,直至部分细小粒径逐渐开始对沉积层内孔隙进行填充,使沉积层与土体结构更加密实,致使土壤导水率降低。由于含沙率越大对孔隙的填充率越大,水分在入渗过程中受阻力越大,减渗效果越明显,故反映在曲线上即同一入渗历时浑水含沙率越大,单位膜孔累积入渗量越小,对应稳定入渗率也越小。

层状土由于阻渗作用的存在,入渗前期为均质土入渗,而当水分入渗至砂土面时在短时间内不再向垂直方向入渗,因此,将层状土浑水单点源自由入渗过程分为 2 个阶段:第 1 阶段为到达层状界面前面的入渗;第 2 阶段水分到达层状界面主要在水平方向产生扩散,此时土壤入渗量随时间曲线出现转折,累积入

渗量减少。经分析,在入渗过程中,2 个阶段不同浑水含沙率累积入渗量与时间的关系曲线均符合 Kostiakov 入渗模型,层状土浑水单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间的关系式可表示为:

$$I=\begin{cases} Kt^a & 0<t<t_i \\ kt^b & t_i\leq t \end{cases} \quad (1)$$

式中: I 为单位膜孔面积累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); t_i 为水分到达砂层所用的时间; K 、 k 分别为第 1、2 阶段入渗系数(cm/min),表示在入渗 1 min 后单位面积累积入渗量,其大小主要受土壤孔隙与结构的影响^[20]; a 、 b 分别为第 1、2 阶段入渗指数,主要反映土壤入渗能力的衰减速率。拟合结果见表 2。

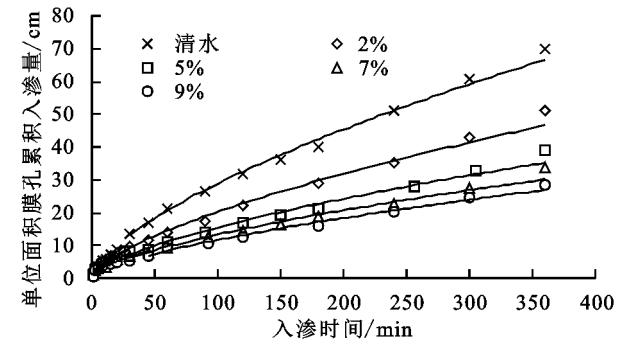


图 2 不同浑水含沙率的累积入渗量曲线

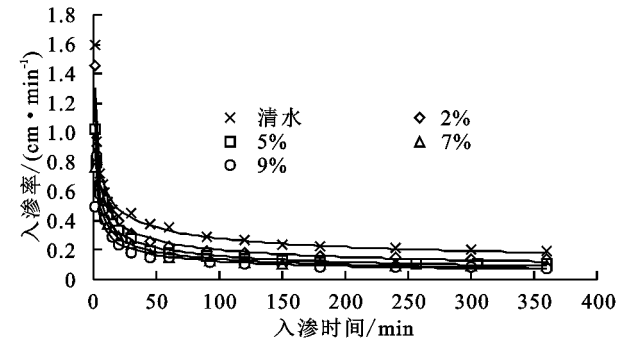


图 3 不同浑水含沙率的入渗率变化曲线

表 2 不同浑水含沙率累积入渗量拟合参数

含沙率/%	K	a	R^2	k	b	R^2
0	1.5358	0.5689	0.9948	1.4248	0.6531	0.9958
2	1.3607	0.5777	0.9939	0.9069	0.6719	0.9936
5	1.1329	0.6010	0.9908	0.6173	0.6930	0.9939
7	0.8095	0.6069	0.9935	0.4592	0.7162	0.9936
9	0.4896	0.6208	0.9972	0.3601	0.7227	0.9887

根据拟合结果,膜孔灌层状土在入渗的 2 个阶段不同含沙率与入渗时间的决定系数 R^2 均大于 0.98,说明采用 Kostiakov 公式所建立的人渗量模型相关关系显著,但 2 个人渗阶段入渗参数明显不同,相比第 1 阶段,第 2 阶段同一含沙率入渗系数由 K 到 k 逐渐减小,而入渗指数由 a 到 b 逐渐增大,说明随着入渗时间的增加,达到砂层界面后,入渗能力明显减弱;同时随着浑水含沙率的增大,入渗参数也表现有相同的趋势。在先前描述中,由于 K 表征入渗开始

1 min 后的单位膜孔累积入渗量, K 的增大也说明了含沙率对累积入渗量的影响。以第 1 阶段为例, 对于初始条件均相同的均质土壤, 浑水中的泥沙改变了土体内孔隙的分布状况, 浑水含沙率越大对土壤结构改变越明显, 使土体相对更加密实, 入渗能力衰减程度越明显, 反映到参数上, 即 K 随含沙率的增大不断减小, a 值随含沙率的增大逐渐增大。

2.2 不同含沙率层状土浑水单点源自由入渗湿润锋运移规律

图 4(a)、图 4(b)分别为不同入渗时刻清水与含沙率 5% 浑水湿润锋运移曲线。由图 4 可以看出, 不同含沙率浑水单点源自由入渗过程中湿润锋运移趋势大致相同, 在未达到砂土层之前, 层状土湿润锋运移规律与均质土一致, 呈规则的椭球体形状^[15], 在此过程中, 土壤在垂直方向受到基质势和重力势的双重作用, 而水平方向仅受基质势作用。因此, 这一阶段同一入渗时间对应垂直湿润锋运移距离大于水平方向。随着入渗时间的增加, 当膜孔中心的垂直湿润锋到达砂土表面时湿润锋形状发生明显变化, 湿润锋运移距离在垂直方向逐渐变

缓, 而在水平方向湿润锋运移距离在基质吸力作用下不断增大, 直至入渗结束后, 整个土体湿润体形状呈不规则椭圆柱体形状, 可近似于 1/8 圆柱体加 1/8 椭球体, 说明层状土入渗阻渗作用明显。以清水为例, 入渗结束后, 水平方向湿润锋运移距离为 13.6 cm, 而垂直湿润锋距离仅为 6.4 cm。这是由于 2 种土壤质地不同, 土体内孔隙分布存在差异, 在壤—砂交界面处由于起主要作用的毛细管吸力不同产生势能差, 上层壤土由于吸力较大导致势能较小, 水分不足以向下层持续入渗, 使湿润锋在垂直方向上运移出现停滞, 湿润锋在壤土基质吸力下沿水平方向不断推进, 与层状土一维垂直入渗不同, 壤—砂界面的能量达到平衡之前时, 随入渗时间的增加, 水平运移距离会一直增大, 直至壤—砂界面的能量达到平衡时, 水分才会继续垂向入渗, 湿润锋开始在垂直方向上运移。对于充分供水的三维点源入渗, 由于相同入渗时间下膜孔中心位置土壤含水量最大, 产生重力势与基质势均最大, 随着离膜孔距离的增大, 势能不断减小, 因此, 表现为膜孔中心处最先达到势能平衡, 水分最先进入砂层。

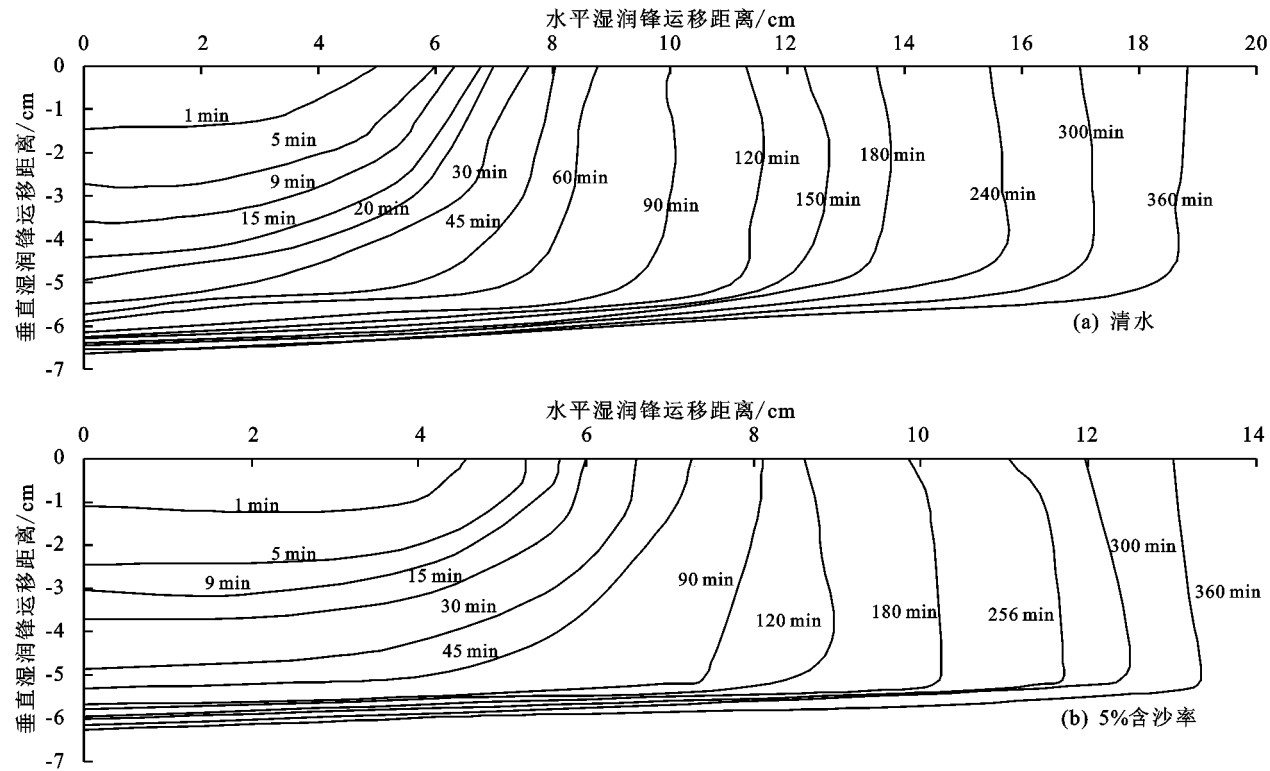
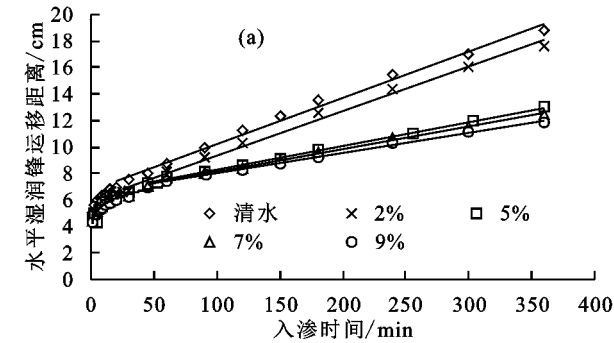


图 4 湿润锋运移距离剖面

为了更直观地比较不同浑水含沙率对层状土湿润锋运移的影响, 绘制不同含沙率水平、垂直湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线(图 5a、图 5b)。从图 5(a)可以看出, 随着含沙率的增大, 同一入渗时刻对应水平和垂直湿润锋均逐渐减小。入渗 360 min 后, 含沙率为 0(清水), 2%, 5%, 7%, 9% 的水平湿润锋运移距离分别为 18.82, 17.60, 13.01, 12.43, 11.85 cm, 较清水入

渗水平湿润锋运移距离, 含沙率为 2%, 5%, 7%, 9% 的浑水膜孔灌层状土水平湿润锋运移距离分别减小 6.48%, 30.87%, 49.12%, 53.57%; 而含沙率为 0, 2%, 5%, 7%, 9% 在膜孔中心位置湿润锋运移距离分别为 7.75, 6.50, 6.27, 6.04, 5.80 cm, 相对于清水入渗垂直湿润锋, 含沙率为 2%, 5%, 7%, 9% 的浑水入渗垂直湿润锋运移距离分别减小 13.69%, 18.99%, 21.96%, 25.06%。

从图 5(b)可以看出,不同浑水含沙率到达夹砂层位置所用时间不同,含沙率为 0(清水),2%,5%,7%和 9%膜孔中心垂直湿润锋运移到砂层表面时所用的时间分别为 21,25,31,44,59 min,说明含沙率越大,到达砂层所用时间越长。由于浑水含沙率越大,进入土体时所携带的泥沙量越大,一是对膜孔处致密层的形成更加有利,二是对土体内孔隙的堵塞程度增大,使



得原土体更加的密实,水分入渗通道减小,湿润锋运移距离减缓。含沙率为 2%时水平湿润运移距离与清水差异不大,当含沙率为 5%时水平湿润锋运移距离相对清水出现明显减小,原因可能是含沙率为 5%时土壤层状土膜孔灌入渗下浑水中的泥沙可能对供试土壤孔隙的填充率较大,在此基础上再增加浑水含沙率对湿润锋运移距离影响不显著。

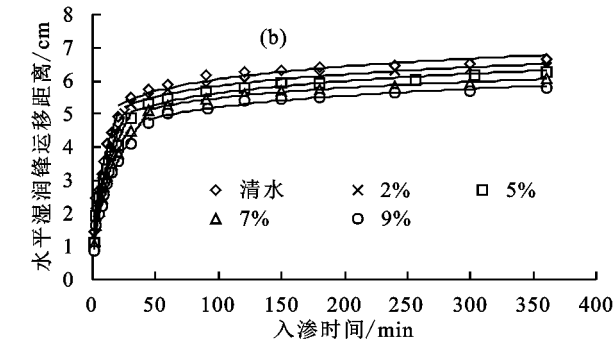


图 5 湿润锋运移距离随时间变化曲线

经分析,不同含沙率浑水膜孔灌层状土水平湿润锋运移距离可通过 2 个阶段进行表示:一是在湿润锋未到达砂层土壤之前的均质土入渗,利用幂函数进行拟合;二是到达砂土之后湿润锋主要沿水平方向的扩散运动,利用线性函数进行拟合,见公式(2),拟合参数见表 3。

$$S_x = \begin{cases} At^B + D/2 & 0 < t < t_i \\ Et + F & t_i \leq t \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_x 为浑水膜孔灌层状土入渗水平湿润锋运移距离(cm); D 为膜孔直径(cm); A 、 B 、 E 、 F 为水平运移参数。

表 3 水平湿润锋运移距离拟合参数

含沙率/%	A	B	R ²	E	F	R ²
0	1.0552	0.3621	0.9921	0.0350	6.7315	0.9925
2	0.7734	0.3898	0.9919	0.0335	6.0136	0.9942
5	0.6253	0.4329	0.9901	0.0176	6.5296	0.9983
7	0.5832	0.4327	0.9922	0.0168	6.4886	0.9969
9	0.5413	0.4375	0.9905	0.0154	6.4513	0.9951

由表 3 可以看出,不同含沙率浑水膜孔灌水平湿润锋与入渗时间相关系数均大于 0.99,说明水平湿润锋在入渗阶段符合公式(2)所建立模型。同时,由拟合参数可以看出,随着含沙率的增大,第一阶段运移系数 A 不断减小,指数 B 不断增大。在第 2 阶段 E 、 F 均不断减小,说明曲线趋势越来越平缓,对应水平运移距离逐渐减小。

同样以膜孔中心处垂直湿润锋运移距离为代表,经分析浑水膜孔灌层状土入渗垂直湿润锋运移距离随入渗时间变化规律符合公式(3),拟合结果见表 4。

$$S_z = \begin{cases} gt^h & 0 < t < t_i \\ Gt^H & t_i \leq t \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_z 为浑水膜孔灌层状土入渗垂直湿润锋运移距离(cm); D 为膜孔直径(cm); g 、 h 、 G 、 H 为垂直运移参数。

表 4 垂直湿润锋运移距离拟合参数

含沙率/%	g	h	R^2	G	H	R^2
0	1.4758	0.4073	0.9923	4.3760	0.0721	0.9728
2	1.2729	0.4176	0.9949	4.1556	0.0751	0.9805
5	1.1730	0.4249	0.9940	3.9987	0.0761	0.9848
7	1.0492	0.4335	0.9963	3.8097	0.0787	0.9907
9	0.9378	0.4444	0.9883	3.6340	0.0798	0.9830

由表 4 可知,膜孔灌层状土入渗膜孔中心处垂直湿润锋运移距离与入渗时间符合显著幂函数关系,且相关系数大于 0.97。随着浑水含沙率的增大,垂直运移参数 g 、 G 逐渐减小,运移指数 h 、 H 逐渐增大,且变化微弱。

2.3 累积入渗量与湿润体体积关系

层状土膜孔灌入渗湿润体形状不同于均质土,试验所采用的 1/4 膜室入渗后湿润体形状近似为 1/8 不规则椭球体,由于垂直入渗 5 cm 后水平方向湿润锋运移速率加快,因此,对于层状土湿润体体积的可描述为以上层壤土厚度为高,水平湿润锋运移距离为半径的 1/8 圆柱体,加上以水平湿润锋为长边、层状交界面以下垂直距离为短边的 1/8 椭球体体积之和,表示公式为:

$$V = \frac{1}{8} \pi S_x^2 \times 5 + \frac{1}{6} \pi S_x^2 (S_z - 5) \quad (4)$$

不同浑水含沙率湿润体体积随入渗时间的变化曲线见图 6。浑水含沙率越大,同一入渗时间累积入渗水量越少,对应湿润体体积越小,经分析两者呈现幂函数关系,且相关性显著。由于湿润体体积与累积

入渗量均为入渗时间的函数,在此分析两者关系,发现同一入渗时间对应浑水湿润体体积与累积入渗量之间同样为幂函数关系,且相关系数均大于 0.98。

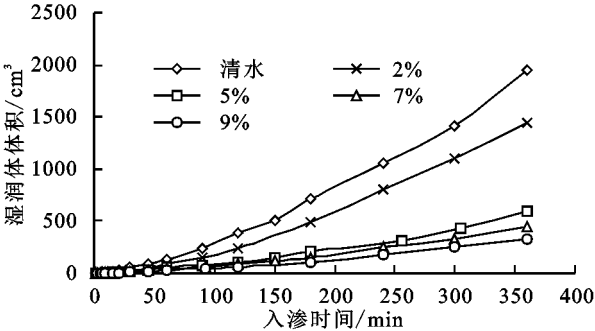


图 6 湿润体体积随入渗时间变化

2.4 不同浑水含沙率土壤湿润体内含水率分布规律

从图 7 可以看出,层状土体的浑水膜孔灌含水率分布等值线不同于均质土体的半椭圆形,在膜孔灌三维点源入渗条件下表现为不规则椭圆形,层状土体的阻水作用使得水分到达砂土表面时出现停滞,由于壤土的毛管吸力远大于砂土,在两土交界面处产生势能差,不足以满足继续入渗的能量要求,故上层土壤水分不断向下运移,水分在一定时间内积聚,显著增加了上层土壤的持水能力。

由图 7 还可看出,距离膜孔中心越近,含水率等值线越稀疏,对应的土壤含水率梯度越小,含水率越大,随着湿润锋运移距离的增加,含水率等值线逐渐密集,含水率梯度也逐渐增大,对应含水率越来越小。在土体同一位置处,浑水含沙率越大,对应位置的土壤含水率越小,这是由于浑水中泥沙在膜孔中心土壤表面沉积,同时部分泥沙随水分进入土壤对土壤孔隙由一定的填充作用,使得土壤结构发生变化,入渗浑水含沙率越大,土壤表面形成致密层的时间越短,水分在入渗所携带进入土体的泥沙越多,使入渗过程中受到阻碍越大,导致土壤导水率不断降低,入渗过程减缓,故表现为在同一位置浑水含沙率越大,对应土壤含水率越低。

3 讨论

水分在入渗过程中受到多种因素的影响^[21-22],目前对土壤初始含水率、土壤容重、质地等因素均有一定研究^[23-24]。浑水灌溉结合我国黄河流域实际情况,引入含有泥沙的浑水水源进行灌溉,使有限水资源能进一步合理分配和利用,因而泥沙含量成为限制水分入渗的主要因素之一。目前,对于层状土入渗方面的研究主要集中于一维土柱试验,对二、三维条件下的研究开展较少,本文在室内特定试验条件下,将浑水灌溉与新型节水灌溉技术膜孔灌相结合,同时考虑层状土阻渗作用,将土壤结构设置贴合实际的层状土,进行含沙率对层状土膜孔灌单点源自由入渗特性影响试验。

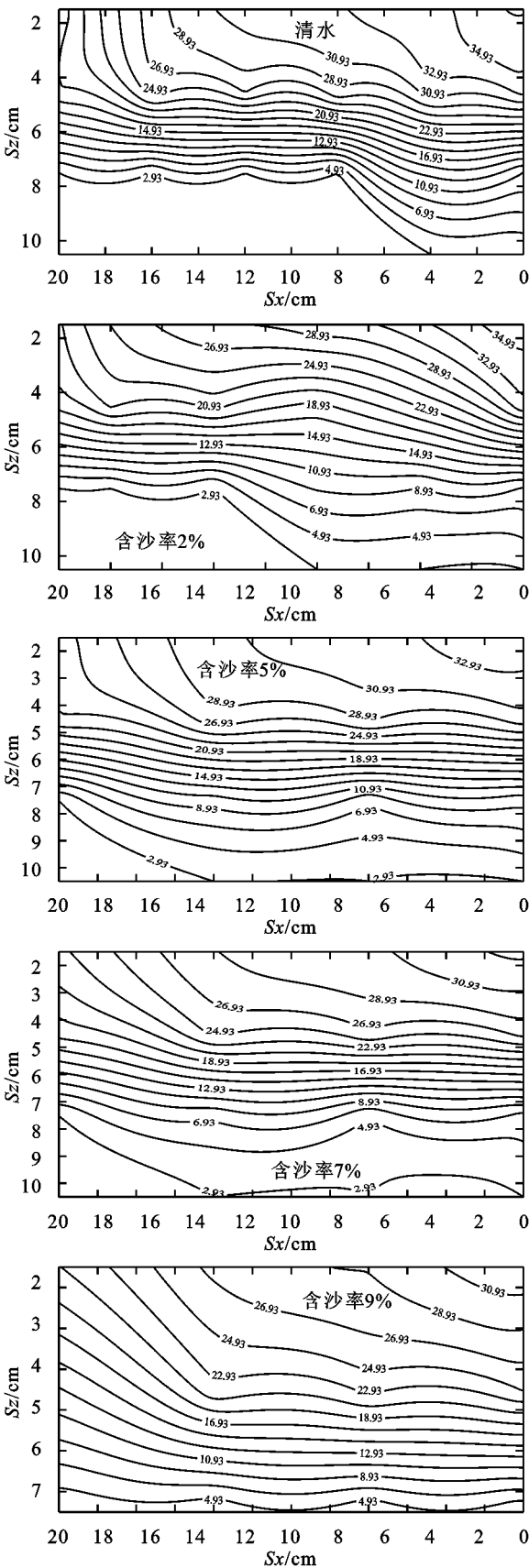


图 7 湿润体内含水率分布等值线图

本研究发现,层状土膜孔灌单点源自由入渗累积入渗量随含沙率增加呈现减小趋势,这与前人^[25]膜孔灌均质土研究结果有一致的趋势。该结果是由于含沙率随水分入渗时对土体孔隙产生填充,泥沙含量

越大随水分入渗进入土体的泥沙越多,使土壤孔隙率降低,导水率减小,对应累积入渗量减少。本研究还发现,由于层状土阻渗作用的存在,在到达壤—砂交界面后,入渗过程中湿润锋运移趋势与均质土完全不同,不同含沙率对水平湿润锋运移距离的影响远大于对垂直湿润锋运移距离。说明在含沙率影响情况下,层状结构土壤所产生的阻渗影响更为明显,土壤水势不平衡所产生的影响远大于泥沙对孔隙结构的影响,针对此部分可做进一步研究探讨。而对于土壤水分分布规律,与湿润锋运移有密切关系,两者结合可更好地揭示水分分布特性。对于同一土壤结构,含沙率对水分分布的影响与累积入渗量具有显著相关关系,湿润体内水分含量同累积入渗量均随含沙率的增大逐渐减小,这与先前研究^[8]结果相一致。

由于本试验主要考虑泥沙影响,所反映的内容为对层状土三维入渗的初步探讨。但在实际生产中,有多种因素、多种土壤层状组合结构,在今后研究中应多加考虑并逐渐扩展至大田研究;其次,针对膜孔灌入渗来说,分为 3 个阶段^[26],本文仅针对自由入渗阶段进行了研究,今后应逐渐开展交汇入渗方面的研究。综合上述问题,在今后的研究中更贴近实际,从而使研究结果具备更充分的参考意义,为作物种植、水土保持等方面研究提供有力依据。

4 结 论

(1)以垂直湿润锋到达壤—砂界面为界限,不同含沙率的层状土浑水膜孔灌单位膜孔面积累积入渗量随入渗时间变化分 2 个阶段,两阶段二者间关系符合 Kostakov 入渗模型,同一含沙率第 1 阶段与第 2 阶段相比,入渗系数不断减小,入渗指数则逐渐增加,说明入渗能力逐渐减弱,层状土阻渗作用明显。同时随着浑水含沙率越大,对应入渗系数随含沙率增大而减小,入渗指数则反之。

(2)层状土膜孔灌湿润体形状为不规则椭球体,在垂直湿润锋到达壤—砂交界面之前,水平与垂直湿润锋运移距离与入渗时间均呈幂函数关系,之后随着入渗时间的增加,水平湿润锋运移距离与入渗时间呈线性函数关系;浑水含沙率越大,入渗结束后湿润锋运移距离越小,浑水阻渗作用越明显。

(3)入渗结束后,土壤水分主要集中在壤—砂界面上,界面以下含水率明显减小,同时距离膜孔中心距离越远,土壤含水量越小;层状土膜孔灌湿润体体积随入渗时间不断增加,同一入渗时间含沙率越大,湿润体体积越小,湿润体内同一位置土壤含水率越小。

参考文献:

[1] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.

[2] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].农业工程学报,2013,29(19):105-111.

[3] 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.

[4] Fan Y W, Gong J G, Wang Y, et al. Application of Philip infiltration model to film hole irrigation[J].Water Supply,2019,19(3):978-985.

[5] Muhammad S, Sajid M. Application of film hole irrigation on borders forwater saving and sunflower production[J].Arabian Journal for Science and Engineering,2013,38(6):1347-1358.

[6] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation[J].Water,2017,9(7):543-560.

[7] 程东娟,赵新宇,费良军.膜孔灌施尿素条件下氮素转化和分布室内模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(12):58-62.

[8] 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.

[9] 钟韵,费良军,刘乐,等.膜孔灌溉下土壤入渗特征的多因素分析[J].水科学进展,2018,29(4):505-513.

[10] 刘文光,贾生海,范严伟,等.夹砂层土壤膜孔灌水分入渗规律数值模拟与试验验证[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):243-248.

[11] 涂安国.层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J].江西农业大学学报,2017,39(4):818-825.

[12] Colman E A, Bodman G B. Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils[J].Soil Science Society of America Journal,1945,9(C):3-11.

[13] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils1[J].Soil Science Society of America Journal,1972,36(5):697-702.

[14] 张建丰.黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2004.

[15] 王文焰,张建丰,汪志荣,等.黄土中砂层对入渗特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):33-41.

[16] 李毅,任鑫,Horton R.不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J].排灌机械工程学报,2012,30(4):485-490.

[17] 吉恒莹,邵明安,贾小旭.水质对层状土壤入渗过程的影响[J].农业机械学报,2016,47(7):183-188.

[18] 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.

[19] 曹惠提,卞艳丽,张会敏,等.浑水灌溉下土壤水分变化研究[J].节水灌溉,2013,1(8):1-6.

[20] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.

1.841 g/kg,62.7%的样品含量低于平均值 0.713 g/kg;TOC 含量为 0.772~25.221 g/kg,62.3%的样品含量低于平均值 5.609 g/kg。变异系数为 0.256~0.967,均属于中等变异;整体上沉积物中 TP 含量变异相对较小,TN、TOC 含量变异性相对较大。

(2)渭河陕西段沉积物中有机质主要受内源影响,且以藻类和浮游动植物为主。2016 年 11 月,在局部河道如林家村、卧龙寺桥、常兴桥、兴平、草滩、清姜河入渭处可能受到外源有机质的影响。在沉积物中磷主要为外源输入,2014—2016 年所有采样断面的 N/P 值均小于 Redfield 比,这可能与沉积物中元素的生物地球化学过程有关。

(3)2015 年汛期内有有机指数与有机氮指数变化一致,即汛前<汛中<汛后。在 2014—2016 年,渭河陕西段沉积物有机氮污染和有机污染得到有效控制,但在局部河道如咸阳铁桥、草滩、黑河入渭和灞河入渭处等距离城市较近区域有反弹的可能,需引起注意。

参考文献:

[1] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等.南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J].湖泊科学,2007,19(4):390-396.

[2] 王亚琼,薛培英,耿丽平,等.白洋淀沉积物—沉水植物—水系统氮、磷分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):304-309.

[3] 王天阳,王国祥.昆承湖沉积物中重金属及营养元素的污染特征[J].环境科学研究,2008,21(1):51-58.

[4] 颜永毫,周杰,何忠,等.3 万年来卤阳湖沉积物地球化学元素变化特征及其环境意义[J].水土保持学报,2016,30(3):208-212.

[5] 李如忠,洪齐齐,罗月颖.巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J].环境科学研究,2010,23(2):144-151.

[6] 彭殿宝,周孝德.渭河流域(陕西段)水体现状及水污染综合治理研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):128-131.

[7] 胡德秀,李立,张艳,等.渭河干流陕西段综合治理前后的水

质变化与趋势[J].水土保持通报,2018,38(5):91-96.

[8] 张台凡,宋进喜,杨小刚,等.渭河陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究[J].环境科学学报,2015,35(5):1393-1399.

[9] 易文利.渭河宝鸡段表层沉积物营养盐分布特征及污染评价[J].河南科学,2014,32(4):616-619.

[10] 石苗.渭河陕西段底泥释放规律及其对水质的影响研究[D].西安:西安理工大学,2016.

[11] 任朝亮,宋进喜,王珍,等.渭河底泥有机质的空间分布及与其他污染物相关性[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):123-128.

[12] 高赞.渭河渭源段河道沉积物盐类分析[J].中国水土保持,2018(2):60-63.

[13] 陈广圣,邓云龙.渭河流域径流变化规律分析[J].吉林水利,2014(12):31-34.

[14] 万红莲,张英.渭河陕西段水情对气候变化的响应[J].江西农业学报,2012,24(1):169-172.

[15] 陶望雄,马亚鑫,张杰,等.渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2016,36(6):110-114.

[16] 刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-47.

[17] 刘鹤,孟婷,程文等.汤浦水库沉积物碳、氮、磷的分布与评价[J].水土保持通报,2017,37(2):333-338.

[18] 张晓晶,李畅游,张生,等.乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1770-1776.

[19] 沈丽丽,何江,吕昌伟,等.哈素海沉积物中氮和有机质的分布特征[J].沉积学报,2009,28(1):158-165.

[20] 刘锐,马腾,邱文凯,等.淤泥沉积物中有机碳的环境意义[J].环境科学与技术,2019,42(1):184-192.

[21] 蔡金榜,李文奇,刘娜,等.洋河水库底泥污染特性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):886-893.

[22] 王书锦.罗时江河口湿地沉积物碳氮磷时空分布规律及潜在生态风险研究[D].昆明:西南林业大学,2017.

[23] 李强,霍守亮,王晓伟,等.巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J].环境工程技术学报,2013,3(2):147-155.

(上接第 49 页)

[21] 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.

[22] 范严伟,马孝义,王波雷,等.膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(11):35-41.

[23] 许尊秋,毛晓敏,陈帅.层状土层序排列对水分运移影响的室内土槽试验[J].中国农村水利水电,2016(8):59-62.

[24] Priyank G, Javed A, Mohammad M. Influence of thickness and position of the individual layer on the permeability of the stratified soil[J].Perspectives in Science,2016,8:757-759.

[25] 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.

[26] 费良军,朱兴华,吴军虎.膜孔灌多向交汇入渗减渗特性和数学模型研究[J].水利学报,2006,37(1):104-108.