

多因素影响下浑水膜孔肥液入渗土壤水分运移特性

张全菊, 费良军, 刘利华, 陈南束, 郝琨, 李中杰

(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: 为研究不同因素对浑水膜孔肥液入渗土壤水分运动特性的影响, 开展室内土箱入渗试验, 试验设土壤初始含水率、土壤容重、含沙率和肥液浓度 4 因素, 每个因素设 3 个水平, 共 12 组试验(9 组正交试验, 3 组验证试验)。分析影响因素对浑水膜孔灌肥液入渗单位膜孔面积累积入渗量、入渗率及湿润体平均体积含水率增量的影响。利用多元回归推求并验证单位膜孔累积入渗量和湿润体平均体积含水率增量与影响因素的经验模型和模型参数。结果表明: 土壤初始含水率、土壤容重、含沙率和肥液浓度对单位膜孔累积入渗量影响极显著($P < 0.01$), 各影响因素影响程度由大到小依次为含沙率、土壤容重、土壤初始含水率、肥液浓度; 土壤初始含水率、含沙率和肥液浓度对湿润体平均体积含水率增量影响极显著($P < 0.01$), 土壤容重对其影响显著($P < 0.05$), 各影响因素影响程度由大到小依次为土壤初始含水率、肥液浓度、含沙率、土壤容重。建立的经验模型及模型参数检验合格, 预测值与实际测算值误差均在 $\pm 10\%$ 以内, 精度良好, 可用于试验因素不同时土壤水分入渗情况预测。

关键词: 浑水膜孔灌; 肥液入渗; 多因素分析; 水分运移

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0265-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.038

Soil Water Movement Characteristics in Muddy and Fertilizer Water Solution Infiltration Under Film Hole Irrigation Affected by Multiple Factors

ZHANG Quanju, FEI Liangjun, LIU Lihua, CHEN Nanshu, HAO Kun, LI Zhongjie

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

Abstract: In order to study the influence of multiple factors on soil water movement characteristics of muddy water film hole fertilizer solution infiltration, indoor soil box infiltration test was carried out. Four experimental factors including initial soil moisture content, soil bulk density, sediment concentration of muddy water and fertilizer solution concentration, 3 levels for each factor, and 12 groups of experiments (9 of orthogonal experiments and 3 of validation experiments). The effects of each factor on cumulative infiltration volume per unit membrane hole area, infiltration rate and average volume water content increment of muddy water membrane hole irrigation fertilizer solution were analyzed. The empirical model and model parameters of cumulative infiltration per unit membrane pore and average volume moisture content increment of wetting body with experimental factors were deduced and verified by multiple regression. The results showed that the initial moisture content of the soil, soil bulk density and sand content and fertilizer concentration had a significant effect on the cumulative inlet of the unit membrane hole ($P < 0.01$). The degree of influence from large to small was the sand content, soil bulk density, the initial soil moisture content, the concentration of fertilizer. The increase in the average moisture content of the wet body was almost independent of the permeation time. The initial moisture content, sand content and fertilizer concentration of the soil were significantly related to it ($P < 0.01$), and the soil weight was significantly related to it ($P < 0.05$), and the degree of influence from large to small was the initial moisture content of the soil, fertilizer concentration, sand content, soil bulk density. The empirical model and model coefficient established were qualified. The error between the predicted and the measured values was within $\pm 10\%$, and the precision was good, which could be used

收稿日期: 2020-07-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(51479161, 51279157, 51779205); 公益性行业科研专项(201203003)

第一作者: 张全菊(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 307240987@qq.com

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

to predict the soil moisture infiltration situation when the experimental factors were different.

Keywords: muddy water film hole irrigation; fertilizer infiltration; multivariate analysis; water movement

膜孔灌是在覆膜灌溉基础上改进发展的充分供水条件下的地面局部灌水技术。既有传统地面灌溉操作简单、运行费用低、对水质要求较低的优点,又兼有覆膜灌溉保水保肥、增温保墒的优点,在我国北方大多缺水地区已得到推广应用,并取得了显著的节水增产效益^[1-2],对膜孔灌入渗特性研究是优化灌水技术要素的基础。

土壤水分入渗主要受供水强度和土壤入渗能力的影响,与土壤自身性质和入渗水源性质密切相关^[3-5]。土壤自身特性如土壤质地、结构、容重和初始含水率等对土壤入渗能力均有影响^[6-8]。入渗水源性质如浑水的含沙率和泥沙黏粒含量^[9]、微咸水的矿化度和钠吸附比^[10-11]、阳离子种类和浓度^[11]、添加保水剂数量及种类^[12]均可通过与土壤颗粒产生物理化学变化影响土壤性质而影响土壤水分入渗。膜孔灌溉过程中这些因素的改变对水分入渗和溶质运移均产生影响^[13-14],陈琳等^[15]研究发现,土壤初始含水率对土壤水氮运移特性有明显影响;钟韵等^[16]研究发现,土壤容重改变会影响土壤孔隙状况,对入渗能力影响显著;刘利华等^[17]研究发现,浑水含沙率对膜孔入渗起抑制作用,减渗率随浑水含沙率增加而增加;康守旋等^[18]研究发现,入渗过程中肥液中阳离子与土壤胶体吸附凝聚形成较大粒子,改变了土壤水入渗通道,肥液浓度增大同一入渗时间累积入渗量也增大。以上对于膜孔灌水分入渗特性研究多为控制变量条件下的单因素研究,多因素影响下膜孔灌溉土壤水分入渗特性研究相对较少,钟韵等^[19]侧重研究了与土壤有关的因素包括土壤容重、初始含水率、黏粒含量、压力水头之间的交互作用对膜孔灌浑水入渗的影响;姜瑞瑞等^[20]研究表明,不同因素共同作用对土壤水分运动特性会产生复杂的影响。为此,本文通过室内正交试验,研究土壤物理特性和入渗水源特性共同影响下浑水膜孔灌肥液入渗土壤水分运移特性,探究施肥条件下多因素交互作用对膜孔灌土壤水分入渗特性的影响,以期浑水膜孔灌肥液入渗研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤为西安北郊农田耕作层土,土壤平均容重 1.32 g/cm^3 。经自然风干、研磨过筛(2 mm),土壤容重分别为 $1.30, 1.35, 1.40 \text{ g/cm}^3$ 时的饱和含水率对应为 $39.02\%, 38.26\%, 36.51\%$ 。利用激光粒度分析仪对试验土壤进行粒径分析,其中 $0 < d \leq 0.002 \text{ mm}$ 、 $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.020 \text{ mm}$ 和 $0.020 \text{ mm} < d \leq$

2.000 mm 颗粒分别占 $9.78\%, 56.59\%$ 和 33.63% (体积分),按国际制土壤质地分类标准试验土壤为粉壤土。将泾惠渠干渠取得泥沙风干过 1 mm 的筛后装袋保存,与硝酸铵钙按试验设计参数配置试验所需的含沙率和肥液浓度的浑水肥液,含沙率和肥液浓度均以占入渗水体质量百分数计。

1.2 试验装置与方法

试验于 2019 年 8—10 月在西安理工大学农水大厅实验室内进行,试验装置示意图见图 1。装土前计算配置不同初始含水率所需水量,用喷壶均匀喷洒于土壤表面,并在土面覆盖一层薄膜静置 24 h,使土样含水率再分布均匀。有机玻璃箱高 40 cm,玻璃箱表面设 5 cm 等间隔的刻度线,按设定土壤容重和土壤初始含水率计算每层装土重量,分层装土(每层 5 cm,装土深度 35 cm),层间打毛。将 1/4 水室紧贴土面粘于土箱一角,在土面覆膜以减少水分蒸发。配好的浑水肥液提前 60 min 装入带自动搅拌装置的马氏瓶,自动搅拌装置以恒定速率搅拌浑水肥液以减少泥沙沉降,试验时保持入渗水头恒定(4 cm)。入渗过程中按先密后疏的时间间隔(1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 min)读取马氏瓶内水位,同时在土箱一侧描绘入渗湿润锋。入渗结束后,在膜孔中心水平方向每隔 2.5 cm,竖直方向每隔 2.5 cm 取土,取至湿润锋运移处为止,利用烘干法测定土壤含水率。

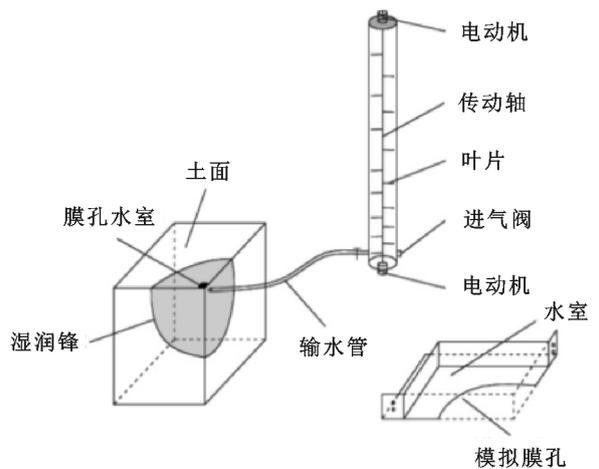


图 1 膜孔灌试验装置示意

1.3 试验设计

结合土壤物理参数与生产实际中水源特性,设土壤容重 γ 、土壤初始含水率 θ 、浑水含沙率 ρ 和肥液浓度 ω 4 个因素,每个因素设 3 个水平(表 1),按正交表 $L_9(4^3)$ 设计试验,并设 3 组验证试验,共 12 组试验(表 2)。

表 1 膜孔灌正交试验设计因素和水平

因素 水平	含沙率 ρ / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	初始含水率 $\theta/\%$	土壤容重 γ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	肥液浓度 ω / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	2	1.7	1.30	600
2	5	3.1	1.35	1000
3	8	4.9	1.40	2000

表 2 膜孔灌入渗试验方案

试验 处理	含沙率 ρ / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	初始含水率 $\theta/\%$	土壤容重 γ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	肥液浓度 ω / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
T1	2(1)	1.7(1)	1.30(1)	600(1)
T2	2(1)	3.1(2)	1.35(2)	1000(2)
T3	2(1)	4.9(3)	1.40(3)	2000(3)
T4	5(2)	1.7(1)	1.35(2)	2000(3)
T5	5(2)	3.1(2)	1.40(3)	600(1)
T6	5(2)	4.9(3)	1.35(1)	1000(2)
T7	8(3)	1.7(1)	1.40(3)	1000(2)
T8	8(3)	3.1(2)	1.30(1)	2000(3)
T9	8(3)	4.9(3)	1.35(2)	600(1)
T10	4	8	1.35	1000
T11	9	6	1.40	2000
T12	2	12	1.30	3000

注:括号内数据为因素水平。

2 结果与分析

2.1 单位膜孔面积累积入渗量

正交试验中单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间关系见图 2,单位膜孔面积累积入渗量随入渗时间增加而增大,且增加速率逐渐减小。相同入渗时间不同处理的单位膜孔面积累积入渗量相差较大,各影响因素的改变对膜孔入渗量均有比较明显的影响。

选取不同入渗历时($t=30, 150, 270 \text{ min}$)的单位膜孔面积累积入渗量(分别记为 I_{30} 、 I_{150} 、 I_{270})，利用极差分析得到影响因素对单位膜孔面积累积入渗量的影响程度。由表 3 可知,3 个人渗时段内影响因素对单位膜孔面积累积入渗量的影响程度均为 $\rho > \gamma > \omega > \theta$ ，其中含沙率、土壤初始含水率、土壤容重与单

位膜孔面积累积入渗量呈负相关关系,与钟韵等^[19]、姜瑞瑞等^[20]研究结果一致;肥液浓度与其呈正相关关系。单位膜孔面积累积入渗量随含沙率增大而减小是因为浑水入渗过程中大部分泥沙颗粒沉降在土壤表层形成致密层,一部分泥沙颗粒进入土壤孔隙改变水流通道,均对土壤水分入渗起阻滞作用,含沙率增加使阻滞作用增强^[4],与浑水膜孔灌的减渗率随含沙率的增加而增大结论相符^[17]。单位膜孔面积累积入渗量随土壤容重增大而减小是因为土壤容重反应了土壤孔隙程度,容重越大土壤孔隙越小,水流通道越小土壤水分入渗越慢,也越易被浑水中沉降的泥沙堵塞^[7-8]。单位膜孔面积累积入渗量随土壤初始含水率增大而减小是因为土壤初始含水率影响了土壤溶液和胶体颗粒上吸附的离子的数量,是影响水分的入渗、传导和入渗速率的重要因素,而且初始含水率越大,入渗湿润锋处水力梯度越小,水分入渗越慢,相同入渗时间的累计入渗量也越小^[6,15]。单位膜孔面积累积入渗量随肥液浓度增大而增大是因为入渗水中常见阳离子有 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等, Na^+ 增多易破坏土壤团聚体的稳定性,使土壤孔隙减小渗透性减小; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 增加则使扩散双电子层向黏粒表面压缩,利于土壤中颗粒较小的粒子凝聚形成土壤团聚体,土壤中大孔隙增加,渗透性增强^[10-11],本试验所选用氮肥中 Ca^+ 易使土壤胶体微粒凝聚形成土壤团聚体,改变土壤水入渗通道,肥液浓度增大相对应入渗率和单位膜孔面积累积入渗量也增大^[18]。

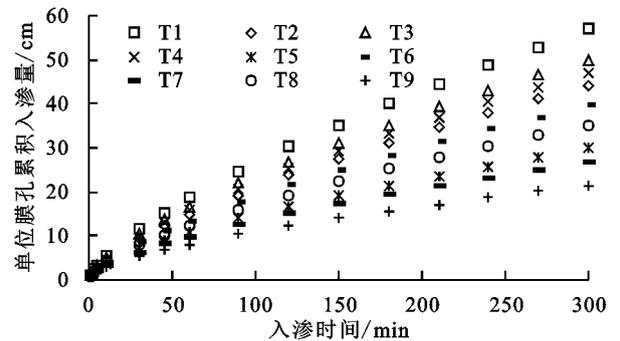


图 2 不同试验方案单位膜孔面积累积入渗量

单位: cm

表 3 单位膜孔累积入渗量极差分析

参数	I_{30}				I_{150}				I_{270}			
	ρ	θ	γ	ω	ρ	θ	γ	ω	ρ	θ	γ	ω
$\overline{K_1}$	10.44	9.24	9.31	7.99	31.36	27.29	27.52	22.88	46.88	40.54	40.90	33.63
$\overline{K_2}$	8.48	8.05	8.15	8.04	24.54	23.10	23.67	23.31	39.38	33.95	34.98	34.40
$\overline{K_3}$	6.49	8.11	7.96	9.39	20.55	23.44	22.63	27.64	29.98	34.55	33.17	41.01
极差	3.94	1.19	1.35	1.40	10.82	3.85	4.89	4.76	16.90	5.99	7.73	7.38
因素主次	$\rho > \gamma > \omega > \theta$				$\rho > \gamma > \omega > \theta$				$\rho > \gamma > \omega > \theta$			

建立单位膜孔面积累积入渗量与各影响因素以及入渗时间之间模型表达式:

$$I = k\rho^a\theta^b\gamma^c\omega^d t^e \quad (1)$$

式中: k 为入渗常数; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为各影响因素的指数; t 为入渗时间 (min)。

将公式(1)两边取对数,利用正交试验 1~9 数据

对模型用多元线性回归求解得:

$$I = 0.9904\rho^{-0.381}\theta^{-0.152}\gamma^{-2.728}\omega^{0.205}t^{0.656} \quad (2)$$

模型决定系数 $R^2 = 0.987 (P < 0.01)$, 均方根误差为 0.08 cm, 模型拟合优度很好。各影响因素系数 $P < 0.01$, 表明各影响因素对单位膜孔累积入渗量影响显著。各影响因素的标准化系数分别为 -0.329, -0.099, -0.124, 0.151, 标准化系数绝对值越大, 对应影响因素对研究变量影响程度越大, 标准化系数为正则变量与因素间为正相关关系, 反之为负相关关系。各影响因素对单位膜孔累积入渗量的影响与极差分析结果一致。

表 4 单位膜孔面积累积入渗量的实测值与模型计算值对比

时间/min	T10			T11			T12		
	试验值/ cm	计算值/ cm	相对 误差/%	试验值/ cm	计算值/ cm	相对 误差/%	试验值/ cm	计算值/ cm	相对 误差/%
3	1.71	1.59	-6.98	1.36	1.27	-6.37	2.58	2.70	4.82
10	3.65	3.50	-4.00	2.95	2.81	-4.91	5.55	5.96	7.27
30	7.36	7.20	-2.12	5.81	5.77	-0.74	12.02	12.25	1.92
60	11.32	11.35	0.28	9.30	9.09	-2.29	19.66	19.30	-1.84
90	14.72	14.81	0.61	12.11	11.86	-2.09	26.00	25.18	-3.17
120	18.11	17.89	-1.25	14.65	14.32	-2.26	31.77	30.41	-4.28
150	22.13	20.71	-6.44	16.89	16.58	-1.86	36.54	35.20	-3.66
240	28.04	28.18	0.51	21.02	22.56	7.34	46.22	47.92	3.67
270	30.00	30.45	1.49	23.06	24.38	5.70	51.17	51.76	1.16
300	31.89	32.63	2.31	24.96	26.12	4.64	56.31	55.47	-1.49

2.2 入渗率影响因素分析

干燥土壤的入渗率在入渗初期很大, 此时入渗率称为初始入渗率简称初渗率, 随之在较短的时间快速减小, 然后逐渐减小至趋于稳定以稳定的入渗率继续入渗, 此时入渗率称为稳定入渗率简称稳渗率^[3]。将单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间函数对时间 t 求导可得到入渗率随入渗时间变化关系(图 3), 膜孔灌浑水肥液入渗试验的入渗率均随入渗时间推移经历快速减小、逐渐减小和趋于稳定的 3 个阶段。

$$i = \frac{dI}{dt} = Kat^{\alpha-1} \quad (3)$$

式中: i 为入渗时间为 t 时的入渗率 (cm/min); I 为单位膜孔累积入渗量 (cm); K 为入渗常数; t 为入渗时间 (min); α 为入渗指数。

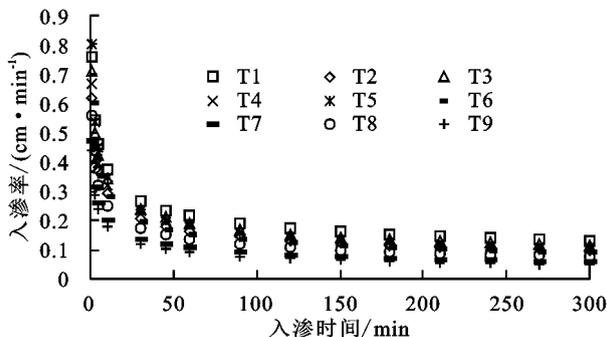


图 3 入渗率变化曲线

利用处理 10, 11, 12 数据验证模型可靠性, 由表 4 可知, 计算值与试验相对误差在 $\pm 10\%$ 内, 模型拟合效果较好。拟合曲线仍是 Kostiakov 模型的形式, Kostiakov 模型在入渗初期因缺少描述初始入渗率的参数而使误差较大^[21], 而且其入渗指数不随试验因素的改变而变化, 入渗初期计算值受入渗指数影响较大而使相对误差较大; 入渗中期的计算值与试验值之间相对误差较小; 入渗后期计算值比试验值偏大原因可能是由于装土过程中下层土反复受压, 使得土层容重比设计容重偏大, 随着入渗水进入下层土壤, 入渗能力减弱, 导致试验实测单位膜孔面积累积入渗量偏小^[19-20]。

选取入渗时间 0~3 min 内平均入渗率为初渗率, 记为 i_0 ; 240~270 min 内平均入渗率为稳渗率, 记为 i_f , 利用极差分析法分析各影响因素对初渗率和稳渗率影响情况。由表 5 可知, 土壤容重、含沙率、土壤初始含水率与入渗率负相关, 肥液浓度与入渗率呈正相关关系, 与康守旋等^[18]研究结果一致。各影响因素对初渗率的影响程度为 $\gamma > \rho > \theta > \omega$; 对稳渗率的影响程度为 $\rho > \gamma > \omega > \theta$ 。影响因素对不同入渗时期入渗率影响程度不同, 原因可能是: 入渗初期土壤表面泥沙沉降和进入土壤孔隙的泥沙较少, 对水土界面的结构和入渗水流通道影响较小; 渗入土体的肥液离子较少, 离子置换作用很少, 对土壤微粒吸附较弱。随着入渗时间延续, 土壤湿润区不断向下扩展, 湿润区内含水率条件差别减小, 土水势梯度逐渐减弱, 初始含水率对入渗率的影响逐渐减小^[6]; 浑水中的泥沙逐渐填充土壤孔隙并在土壤表面形成一定厚度的致密层, 较大的含沙率对土壤孔隙填充情况和土壤表面致密层结构影响较大, 因此含沙率对稳定入渗率的影响程度大于土壤容重。入渗初期初渗率相差较大, 入渗率越大相同时间内累积入渗量越大, 但入渗率在短时间内快速减小, 随之经历缓慢减小后逐渐趋于一个定值^[3], 实际灌水过程时间较长, 稳渗率对

入渗影响逐渐大于初渗率,单位膜孔累积入渗量和稳渗率受各影响因素的影响程度一致。

表 5 初渗率和稳渗率极差分析

单位:cm/min

参数	i_0				i_f			
	ρ	θ	γ	ω	ρ	θ	γ	ω
$\overline{K_1}$	0.476	0.468	0.492	0.432	0.126	0.119	0.118	0.107
$\overline{K_2}$	0.444	0.443	0.438	0.445	0.111	0.108	0.112	0.108
$\overline{K_3}$	0.407	0.416	0.396	0.450	0.099	0.104	0.100	0.116
极差	0.070	0.052	0.096	0.018	0.027	0.015	0.018	0.009
因素主次	$\gamma > \rho > \theta > \omega$				$\rho > \gamma > \omega > \theta$			

2.3 湿润体平均体积含水率增量

试验过程中按由密到疏的时间间隔描绘了湿润锋运移情况,湿润体体积可按 1/4 半椭球体计算,根据水量平衡原理,湿润体内含水量的增量等于累积入渗量,平均体积含水率增量为累积入渗量 W 和湿润体体积 V 比值:

$$V = \frac{\pi}{6} F_x^2 F_z \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \frac{W}{V} = \frac{\pi D^2 I}{16V} \quad (5)$$

式中: V 为入渗湿润体体积(cm^3); F_x 、 F_z 分别为入渗水平湿润锋和垂直湿润锋距膜孔中心的距离(cm); $\Delta\theta$ 为湿润体平均体积含水率增量(cm^3/cm^3); W 为累积入渗量(cm^3)。

湿润体体积与累积入渗量两者函数关系拟合为过原点的线性函数,相关系数均在 0.98 以上(图 4),函数斜率即为湿润体平均体积含水率增量(表 6),几乎不受入渗时间影响,与钟韵等^[19]研究结果一致。

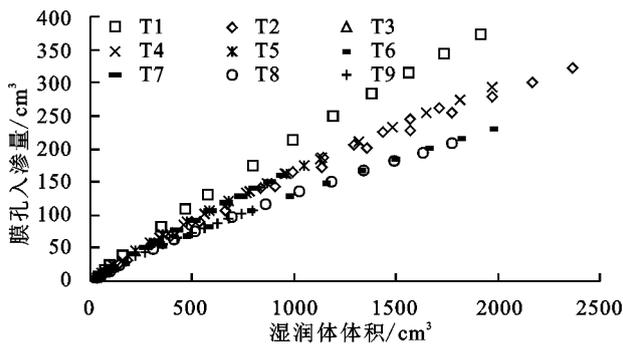


图 4 湿润体体积与累积入渗量关系

利用极差分析得出各影响因素对湿润体平均体积含水率增量的影响程度为 $\theta > \omega > \rho > \gamma$ (表 7)。土壤初始含水率、含沙率、肥液浓度与湿润体平均含水率增量呈负相关关系;土壤容重与其呈正相关关系。初始含水率增加既加快了湿润锋运移速度又减少了累积入渗水量,湿润体平均含水量增量明显减小。含沙率和土壤容重增大,入渗量和湿润锋运移距离均减小;肥液浓度增大入渗量和湿润锋运移距离均增大,它们与湿润体平均体积含水率增量相关性较为复杂。

表 6 湿润体平均面积含水率增量

试验处理	$\Delta\theta/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	R^2
T1	0.1975	0.993
T2	0.1595	0.994
T3	0.1429	0.994
T4	0.1571	0.989
T5	0.1716	0.992
T6	0.1243	0.988
T7	0.1767	0.996
T8	0.1245	0.986
T9	0.1430	0.988

表 7 湿润体平均体积含水率增量极差分析

参数	ρ	θ	γ	ω
$\overline{K_1}$	0.1680	0.1783	0.1500	0.1719
$\overline{K_2}$	0.1510	0.1520	0.1533	0.1536
$\overline{K_3}$	0.1481	0.1367	0.1637	0.1415
极差	0.0199	0.0416	0.0137	0.0305
因素主次	$\theta > \omega > \rho > \gamma$			

建立湿润体平均体积含水率增量与各影响因素之间模型表达式为:

$$\Delta\theta = f\rho^m\theta^n\gamma^p\omega^q \quad (6)$$

式中: f 、 m 、 n 、 p 、 q 为模型参数。

将公式(6)两边取对数,利用正交试验 1~9 数据对模型用多元线性回归求解得:

$$\Delta\theta = 0.4365\rho^{-0.094}\theta^{-0.249}\gamma^{1.485}\omega^{-0.155} \quad (7)$$

模型决定系数 $R^2 = 0.982$ ($P < 0.01$),均方根误差为 $0.0305 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,模型拟合优度很好。含沙率、土壤初始含水率、肥液浓度系数 $P < 0.01$,对湿润体平均体积含水率增量影响极显著;土壤容重系数 $P < 0.05$,对湿润体平均体积含水率增量影响显著。各试验因素标准化系数分别为 $-5.344, -10.627, 4.420, -7.521$,对平均体积含水率增量的影响与极差分析法结果一致。利用处理 10,11,12 数据验证回归模型,由表 8 可知,模型计算值与试验值之间相对误差在 $\pm 6\%$ 内,可用来计算不同试验变量下的湿润体平均体积含水率增量。

表 8 平均体积含水率增量的实测值与模型计算值对比

试验处理	试验值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	计算值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对 误差/%
T10	0.1093	0.1107	-1.26
T11	0.0914	0.0892	2.52
T12	0.0749	0.0754	5.71

3 结论

(1) 土壤初始含水率、土壤容重、含沙率和肥液浓度对浑水膜孔灌肥液入渗单位膜孔面积累积入渗量均有极显著影响($P < 0.01$); 各影响因素对单位膜孔累积入渗量影响程度由大到小依次为含沙率、土壤容重、土壤初始含水率、肥液浓度; 建立的单位膜孔面积累积入渗量与影响因素之间的回归模型拟合优度很好; 模型计算值和试验值相对误差在 $\pm 10\%$ 内, 可用来计算不同试验变量下单位膜孔面积累积入渗量。

(2) 土壤初始含水率、土壤容重、含沙率和肥液浓度对初渗率的影响程度由大到小依次为土壤容重、含沙率、土壤初始含水率、肥液浓度; 对稳渗率的影响程度由大到小依次为含沙率、土壤容重、肥液浓度、土壤初始含水率, 与对单位膜孔面积累积入渗量影响一致。

(3) 湿润体平均体积含水率增量与含沙率、土壤初始含水率、肥液浓度关系极显著($P < 0.01$), 与土壤容重关系显著($P < 0.05$); 各影响因素对平均含水率增量的影响程度由大到小依次为土壤初始含水率、肥液浓度、含沙率、土壤容重; 建立的平均体积含水率增量与影响因素之间回归模型拟合优度很好, 模型计算值和试验值相对误差在 $\pm 6\%$ 内, 可用来计算不同试验变量下的湿润体平均体积含水率增量。

参考文献:

[1] 贾丽华, 费良军. 膜孔灌技术田间试验研究进展[J]. 中国农业信息, 2015(24): 45-46, 131.

[2] Muhammad S, Sajid M. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 32(6): 1347-1358.

[3] 陈翠琴. 土壤入渗的物理过程研究[J]. 农业灾害研究, 2015, 5(7): 51-52.

[4] 吕振豫, 刘姗姗, 秦天玲, 等. 土壤入渗研究进展及方向评述[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 1-5.

[5] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 108-114.

[6] 刘畅, 陈俊英, 张林, 等. 初始含水率对斥水黏壤土入渗特性

的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 354-361.

[7] 张策, 赵玉玲, 程东娟, 等. 土壤容重对盐碱土膜孔沟灌水盐运移分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 261-264.

[8] Hu A Y, Yu Z Y, Liu X H, et al. The effects of irrigation and fertilization on the migration and transformation processes of main chemical components in the soil profile [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 46(1): 2631-2648.

[9] 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.

[10] 何婧, 屈忠义, 刘霞, 等. 微咸水滴灌条件下沙穴种植的土壤水盐二维空间分布规律[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 332-341.

[11] 李慧, 林青, 徐绍辉. 咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 656-666.

[12] 张慧瑛, 樊丹阳, 卢妹妹, 等. 利用小麦秸秆制备的保水剂性能研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 193-198.

[13] 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.

[14] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation [J]. Water, 2017, 9(7): 543-561.

[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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 姜瑞瑞, 费良军, 傅渝亮, 等. 多因素浑水膜孔灌入渗特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 415-420.

[21] 黎明扬, 刘廷玺, 罗艳云, 等. 半干旱草原型流域土壤入渗过程及转换函数研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 936-946.