

新疆额敏灌区砂质壤土滴灌线源入渗规律*

王政东¹, 范文波¹, 胡子涛¹, 马伟斌¹, 许燕², 王春霞¹, 乔长录¹

1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000
2. 新疆生产建设兵团第九师水文水资源管理中心, 新疆 额敏 834600

摘要: 为探究线源滴灌下的土壤水分运移规律, 以新疆额敏灌区砂壤土为研究对象, 利用室内土槽装置进行三滴头线源入渗试验。试验设置了 3 个滴头间距 (10、20、30 cm) 与 3 个滴头流量 (1.0、1.5、2.0 L/h) 共 9 个处理组, 监测了 6 h 滴水过程中的湿润锋动态运移情况。结果表明: 1) 水平与垂直湿润锋运移距离与入渗时间均符合幂函数关系 ($R^2 > 0.98$)。2) 在相同滴头间距下, 流量越大, 湿润锋交汇时间越短 (最短 1 min) 且交汇时垂直入渗深度越浅 (最浅 4.2 cm), 但滴灌结束时的最终垂直入渗深度越深 (最深 39 cm)。3) 在相同滴头流量下, 间距越大, 湿润锋交汇时间越长 (最长 55 min) 且交汇时垂直入渗深度越深 (最深 11.5 cm), 但滴灌结束时的最终垂直入渗深度越浅 (最浅 23.1 cm)。本研究阐明了滴头流量与间距对湿润体形态的协同调控机制, 可为额敏灌区滴灌系统的参数优化与设计提供科学依据。

关键词: 砂质壤土; 线源入渗; 湿润锋; 交汇入渗

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)02-0039-07

Infiltration characteristics of line-source drip irrigation in sandy loam soil, Emin irrigation district, Xinjiang

WANG Zhengdong¹, FAN Wenbo¹, HU Zitao¹, MA Weibin¹, XU Yan², WANG Chunxia¹, QIAO Changlu¹

1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China
2. Hydrological and Water Resources Management Center of the 9th Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Emin 834600, China

Abstract: To investigate soil water movement under line-source drip irrigation, a study was conducted using an indoor soil tank setup with three emitters on sandy loam soil from the Emin Irrigation District in Xinjiang. The experiment included three emitter spacings (10, 20, and 30 cm) and three emitter flow rates (1.0, 1.5, and 2.0 L/h), resulting in a total of nine treatments. The wetting front dynamics were monitored over a 6 h irrigation period. The results showed that: 1) Both the horizontal and vertical wetting front movement distances were best described by a power function of infiltration time ($R^2 > 0.98$). 2) At the same emitter spacing, higher flow rates resulted in shorter wetting front convergence times (the shortest being 1 min) and shallower vertical infiltration depths at convergence (the shallowest being 4.2 cm). However, they led to greater final vertical infiltration depths at the end of the irrigation period (up to 39 cm). 3) At the same emitter flow rate, larger spacings led to longer

* 收稿日期: 2025-09-23 录用日期: 2025-12-23 网络首发日期: 2026-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (52369012); 第九师财政科技计划项目 (2024JS013, 2025JS008)

作者简介: 王政东 (2001 年生), 男; 研究方向: 农业水土资源高效利用; E-mail: 2574824765@qq.com

通信作者: 范文波 (1975 年生), 男; 研究方向: 节水灌溉及农业水土资源高效利用; E-mail: fwb205@163.com

全文阅读



ZR20250207

wetting front convergence times (up to 55 min) and deeper vertical infiltration at the moment of convergence (up to 11.5 cm). However, they resulted in smaller final vertical infiltration depths at the end of irrigation (as shallow as 23.1 cm). This study elucidates the synergistic mechanism of emitter flow rate and spacing on the wetting pattern, providing a scientific basis for optimizing drip irrigation system parameters and design in the Emin Irrigation District.

Key words: sandy loam soil; line-source infiltration; moist front; interference infiltration

额敏灌区地处新疆塔城(82°15'E—85°10'E, 45°25'N—47°03'N),属于中温带干旱和半干旱气候区(王世威等,2024),年均降水量350 mm、年均蒸发量1 936 mm、年均日照2 489 h、无霜期平均123 d,是新疆重要的粮食生产基地。因其属于干旱缺水地区,为提高水资源利用率,农作物灌溉主要采用滴灌技术(郭宏伟等,2017)。

滴灌是当下最高效的节水灌溉方式之一(Yang et al., 2023; Ran et al., 2024),可以按照作物需水要求,通过管道系统将水和养分均匀缓慢地滴入作物根部土壤中。滴灌对土壤结构的破坏程度和蒸发损失小,可减少地面径流和深层渗漏,提高肥效,具有更好的节水增产效果(Han et al., 2023; 张东华等, 2024)。在滴灌技术应用中,滴灌带的布设至关重要,而其与土壤水分运动规律紧密相关(马国荣等, 2024; 薛亮等, 2025)。对土壤水分运动规律的认识,经历了从理想化点源模型向复杂真实场景模型的不断深化。早期研究基于单点源入渗理论,建立了湿润锋运移与时间的关系模型,提出了湿润体平均含水量计算公式(费良军等, 2001),奠定了理论基础。随后,为应对实际灌溉中的复杂情况,研究转向线源入渗(程慧娟等, 2021; 何振嘉等, 2022)等更复杂的空间构型,揭示出滴头间距、初始含水率、滴头流量等参数对水分运动的影响。近年来,利用专业软件进行数值模拟成为滴灌试验的主流方法(张颢辉等, 2023; 王惠等, 2023),其研究重点在于模拟数据与试验数据之间的相互验证(Mao et al., 2016; Wang et al., 2024),以及利用三维模拟软件(如HYDRUS-3D)实现对线源水分入渗的高精度模拟(李耀刚等, 2021)。

尽管前人在物理试验、理论分析和数值模拟上开展了较多研究(张雪晨等, 2022),对滴灌技术的推广应用起到了积极推动作用,但对新疆额敏灌区不同滴头间距与流量条件下的线源入渗规律却鲜有研究(王东旺等, 2022; 张磊等, 2024)。由于影响

线源滴灌湿润锋运移特性的因素较多,且线源交汇入渗水分运移情况较复杂,因此有必要根据额敏灌区的土壤特点,开展不同条件下线源入渗水分运动规律研究,以期为额敏灌区农田节水灌溉技术的科学使用和水资源的高效利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验用土取自新疆额敏灌区,取土深度为表层至40 cm层。将土壤自然风干后清除杂质,过2 mm网筛备用。土壤质地组成以细沙为主,结构松散、孔隙度大,土壤剖面层次分化不明显。采用激光粒度分析仪(LS 13320 Single WL)对试验土壤进行颗粒分析,得出土壤颗粒组成为黏土9.65%、粉土25.7%和砂土64.65%。根据国际制土壤类型标准(范瑞宇等, 2021),供试土壤为砂壤土,该类型土壤在额敏灌区非常典型。供试砂壤土孔隙率为42.55%,土壤饱和导水率为30 mm/h,土壤有机质质量分数1.9%,饱和含水率为28.5%。

1.2 试验装置

试验装置由供水装置、试验土槽(150 cm×50 cm×80 cm)和滴水装置组成(图1)。滴水装置采用了可调节流量和时间的KXP 100智能蠕动泵(卡川尔流体科技有限公司)与橡胶软管滴头组合,精确模拟滴头出水。试验前将风干土壤过2 mm网筛,按照设计容重分层装箱。

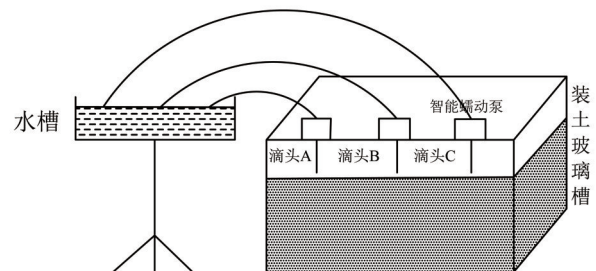


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

1.3 试验设计

本研究重点考虑了滴头流量和滴头间距2个因素。线源入渗试验设置了1.0、1.5和2.0 L/h 3个滴头流量(q)和10、20、30 cm 3个滴头间距(d)。灌水时间的选择考虑生产实际和试验观测效果2个方面,设置为6 h。试验共设9个处理组(T1~T9),为减小试验误差每个处理设置3个重复,取平均值进行数据分析。试验设计见表1。

表1 试验设计
Table 1 Experimental design

| 滴头条件 | 流量 $q/(L \cdot h^{-1})$ | 间距 d/cm |
|------|-------------------------|-----------|
| T1 | 1.0 | 10 |
| T2 | 1.0 | 20 |
| T3 | 1.0 | 30 |
| T4 | 1.5 | 10 |
| T5 | 1.5 | 20 |
| T6 | 1.5 | 30 |
| T7 | 2.0 | 10 |
| T8 | 2.0 | 20 |
| T9 | 2.0 | 30 |

1.4 试验方法

根据野外实地调查,额敏灌区土壤容重普遍为 $1.40 g/cm^3$ 左右,故设定试验土壤容重为 $1.40 g/cm^3$,按此土壤容重每隔10 cm进行人工夯实,层与层之间打毛,使土层紧密接触。

水槽装满水作为供水装置,调节KXP 100智能蠕动泵使其达到设计流量。线源试验使用3个智能蠕动泵控制滴头流量,模拟滴头滴水。出水口距离土壤表面1 cm处。

由于滴灌时土壤湿润锋的前移速度会随时变动,故采用边滴灌边测量的办法,实时记录湿润锋前移距离。试验于2025年3月在石河子大学水利建筑工程学院水利灌溉试验大厅进行,每组试验重复3次。试验土壤为砂壤土,测得其初始含水率(θ)为1.10%。观测时间设为3、5、10、20、30、60、120、180、240、300、360 min,在观测时间点用记号笔勾绘湿润锋,并记录。

本研究使用Excel 2019软件进行数据的收集与处理,将处理后的数据输入Origin Pro 2018软件,进行点线图及柱状图绘制,之后根据图形特性进行函数拟合,作出幂函数拟合曲线。

2 结果与分析

2.1 滴头流量对湿润锋运移的影响

由于各处理组间的湿润锋运移规律具有相似性,故本研究选取T3、T6、T9 3个处理组进行代表性分析。图2呈现了在特定土壤容重($1.40 g/cm^3$)、初始含水率(1.10%)及滴头间距(30 cm)条件下,不同滴头流量对应的湿润锋运移情况。 X 、 Y 方向的湿润锋运移距离与入渗时间呈正相关。在相同时段内,滴头流量与运移距离成正比,即滴头流量越大,湿润锋水平和垂直运移距离越远。上述处理组的运移速率均表现出随时间递减的趋势。水平湿润锋在灌溉结束时的运移距离为T9(31.50 cm)>T6(29.50 cm)>T3(28.75 cm),T9的运移距离较T6和T3分别增加了6.78%和9.56%。在垂直方向上,运移距离为T9(31.0 cm)>T6(28.70 cm)>T3(23.10 cm),T9的运移距离较T6和T3的增幅分别达8.01%和34.20%,三者差距更为显著。

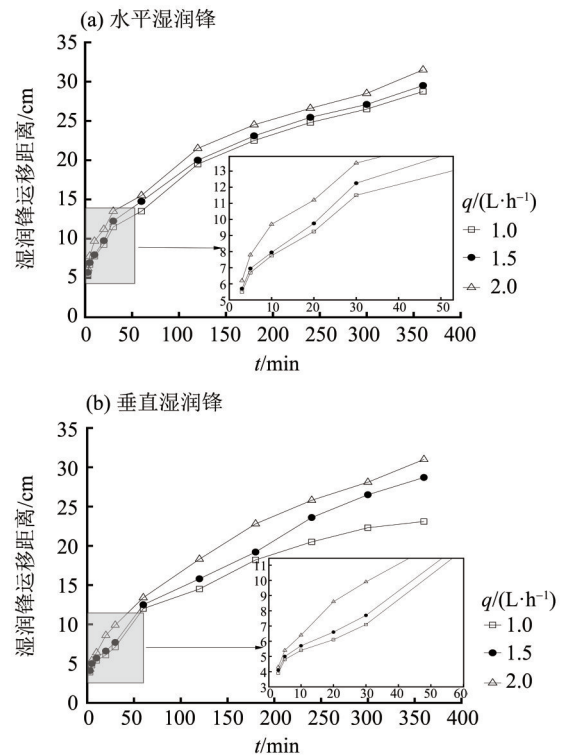


图2 相同滴头间距不同滴头流量条件下湿润锋运移情况
Fig. 2 Transport of wetting front under different emitter flow rates at the same emitter spacing

上述结果表明,滴头流量是影响湿润锋运移的关键因素,尤其对垂直方向的运移具有更为显著的促进作用。此外,湿润锋的动态过程呈现典型的“先快后慢”特征。因此,滴头间距固定时,通过提

高滴头流量,可以加速湿润锋的推进并扩大其最终湿润范围。

2.2 滴头间距对湿润锋转移的影响

以 T1、T2、T3 为代表进行对照分析,探究相同滴头流量下不同滴头间距对湿润锋转移的影响。由图 3 可知,滴头间距改变了水分的空间分布格局。具体表现为:水平湿润锋的最终转移距离随滴头间距的增大而增加,垂直湿润锋的转移距离则随之减小。滴灌结束时,水平湿润锋距离从 T1 的 28.20 cm 增至 T3 的 28.75 cm (增幅为 1.95%)。垂直湿润锋距离从 T1 的 31.4 cm 减至 T3 的 23.1 cm (降幅为 26.43%)。此外,所有处理组的湿润锋转移速率均随时间呈现衰减趋势。上述结果表明,在恒定流量下,滴头间距是调控土壤湿润体形态的关键参数。较小的滴头间距有利于水分向下运移,形成“窄深”的湿润体;较大的间距则促使水分向侧向扩散,形成“宽浅”的湿润体。上述结果可为不同作物根系结构优化滴灌设计提供理论依据。

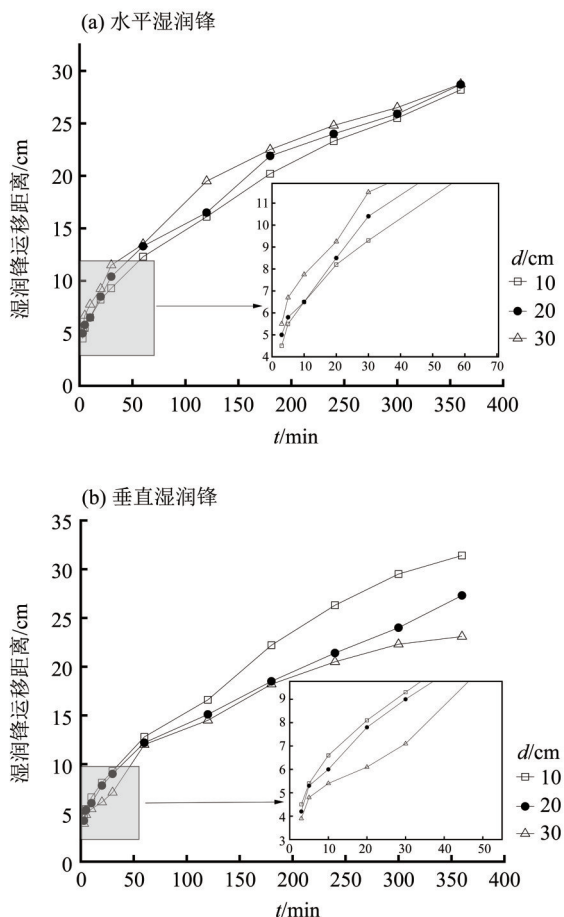


图3 相同滴头流量不同滴头间距条件下湿润锋转移情况
Fig. 3 Wetting front transport under identical emitter flow rates with varying emitter spacing

2.3 不同处理下湿润锋与灌水时间的回归关系

幂函数曲线可拟合滴灌条件下入渗时间与湿润锋发展的关系(包城等,2020):

$$y = at^b,$$

式中 y 为湿润锋入渗距离 (cm), t 为入渗时间 (min), a 、 b 为拟合参数。

图 4 是以 T6 处理为代表的湿润锋转移与滴灌时间关系曲线,可以发现两者呈现出较好的幂函数关系。各处理组的湿润锋与入渗时间的拟合参数见表 2,决定系数 R^2 均大于 0.980,拟合效果较好,可精确表示湿润锋随时间的变化规律。

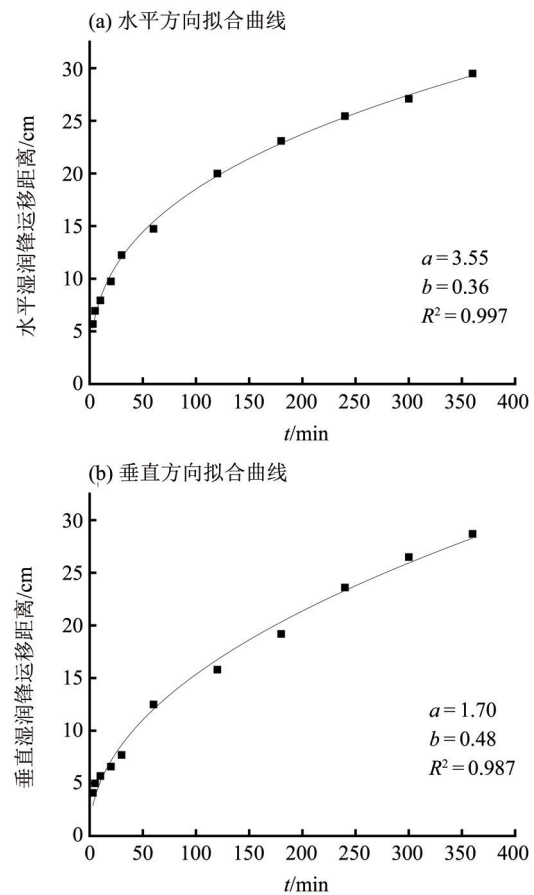


图4 湿润锋与入渗时间的关系
Fig. 4 Relationship between wetting front and infiltration time

2.4 湿润锋交汇入渗情况

图 5 显示出不同处理组合对相邻滴头间湿润锋交汇时间的影响。结果表明,交汇时间与滴头流量呈负相关,与滴头间距呈正相关。在固定滴头间距时,增大流量可显著缩短交汇时间;在固定滴头流量时,增大间距则会显著延长交汇时间。上述结果

证实了滴头流量与滴头间距是控制交汇进程的2个关键因素。在最小间距(10 cm)条件下,各流量均能实现快速交汇,时间介于1~3 min;而在最大间距

(30 cm)条件下,交汇时间则被大幅延迟至30~55 min,这表明较大的滴头间距会显著延缓根区湿润体的连贯过程。

表2 不同条件下水平垂直湿润锋与灌水时间拟合结果

Table 2 Fitting results of horizontal and vertical wetting fronts and irrigation time under different conditions

| 处理组 | $q/(L \cdot h^{-1})$ | d/cm | $\theta/\%$ | 水平湿润锋 | | | 垂直湿润锋 | | |
|-----|----------------------|--------|-------------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| | | | | a | b | R^2 | a | b | R^2 |
| T1 | 1.0 | 10 | 1.10 | 2.29 | 0.42 | 0.993 | 1.95 | 0.47 | 0.989 |
| T2 | 1.0 | 20 | 1.10 | 2.60 | 0.40 | 0.993 | 2.18 | 0.42 | 0.989 |
| T3 | 1.0 | 30 | 1.10 | 3.27 | 0.37 | 0.995 | 2.01 | 0.42 | 0.989 |
| T4 | 1.5 | 10 | 1.10 | 2.88 | 0.38 | 0.994 | 1.75 | 0.51 | 0.984 |
| T5 | 1.5 | 20 | 1.10 | 3.17 | 0.37 | 0.993 | 1.92 | 0.47 | 0.981 |
| T6 | 1.5 | 30 | 1.10 | 3.55 | 0.36 | 0.997 | 1.70 | 0.47 | 0.989 |
| T7 | 2.0 | 10 | 1.10 | 3.23 | 0.37 | 0.993 | 2.25 | 0.48 | 0.997 |
| T8 | 2.0 | 20 | 1.10 | 3.56 | 0.36 | 0.994 | 2.48 | 0.44 | 0.986 |
| T9 | 2.0 | 30 | 1.10 | 4.19 | 0.34 | 0.995 | 2.28 | 0.44 | 0.989 |

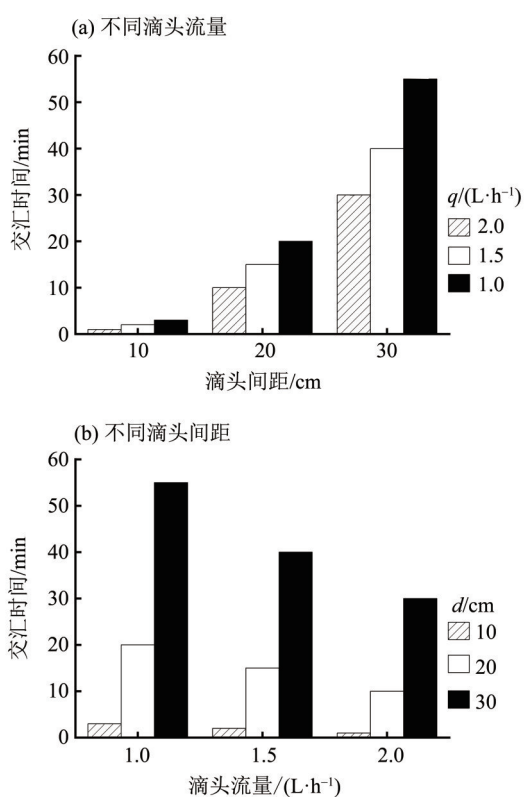


图5 不同处理下湿润锋交汇时间

Fig. 5 Intersection time of wetting front under different treatments

图6显示了不同处理组合下,相邻湿润锋发生交汇时的垂直入渗深度。结果表明,垂直入渗深度受滴头流量与间距的交互影响,反映出水分运移与交汇时间的竞争机制。在固定滴头间距时,垂直入

渗深度与滴头流量呈负相关。流量增大显著加速了湿润锋的交汇进程,缩短了水分的垂直运移时间,导致交汇时的垂直入渗深度减小。以30 cm滴头间距为例,流量最大的T9(2 L/h)其深度最小(9.9 cm),T3(1 L/h)的深度(11.5 cm)比T9高出了16%。这一规律在20与10 cm滴头间距下同样成立。相反,在固定滴头流量时,垂直入渗深度与滴头间距呈正相关。间距增大延长了湿润锋的交汇时间,使水分的垂直运移历时更长,导致交汇时的人渗深度增加。例如,在1 L/h流量下,T3(30 cm间距)的垂直入渗深度(11.5 cm)较T1(10 cm间距)增加了155%。这一趋势在更大流量(1.5与2 L/h)条件下也保持一致。综上所述,湿润锋交汇时的垂直入渗距离由滴头流量和滴头间距共同决定,大流量会限制水分垂直入渗,大间距则会促进水分垂直入渗。

3 讨论

滴灌技术在新疆使用普遍,大幅缓解了其水资源短缺问题(张子辉等,2020)。线源入渗水分运动规律是干旱区滴灌带布设的重要依据,大量点源和线源相关规律研究表明,线源入渗受多种因素影响,而交汇时间和湿润锋是主要因素。本研究根据各数据绘制点线图拟合发现,不同条件下水平和垂直方向湿润锋的运移距离均与入渗时间存在良好

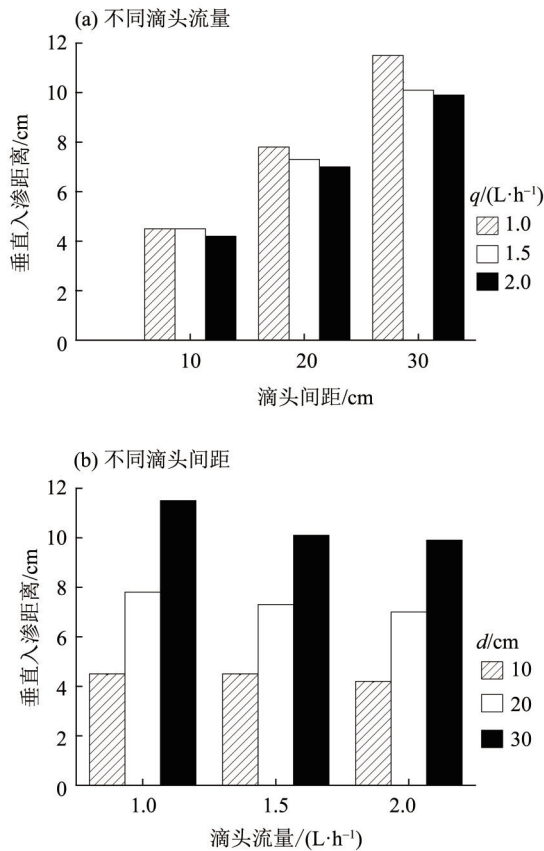


图6 相邻湿润锋交汇时垂直入渗深度

Fig. 6 Vertical infiltration depth at the intersection of adjacent wetting fronts

的幂函数关系。水分运动遵循单点源滴灌入渗规律,湿润体的形状逐渐变为半椭圆形,随着时间增长,各滴头湿润锋发生交汇后,3个分离的半椭圆形逐渐融合成为半花生壳形,最后变成中间宽两边窄的半椭圆形。

通过室内模拟试验,本研究明确了滴头流量与间距是调控线源滴灌湿润体形成过程的2个关键参数。其主要作用规律与机制如下:1)湿润锋的交汇时间主要受控于滴头间距。在恒定流量下,交汇时间与间距呈显著正相关,这是由水分水平运移路径长度直接增加所致。2)湿润锋的运移遵循典型的点源入渗规律,即运移距离与时间正相关,运移速率随时间递减并最终收敛。观测表明,滴灌参数的改变对垂直方向运移的影响高于水平方向,这凸显

参考文献:

包城,秦子程,高福祥,等,2020.和田风沙土单滴头点源入渗特征研究[J].中国农村水利水电(9):66-70+74.
程慧娟,于庆峰,王全九,2021.入渗模型对垂直线源灌线

了垂直入渗在系统设计中的关键地位。3)值得注意的是,本研究揭示了参数对湿润体形态的协同控制机制,并区分了“交汇时”与“结束时”2种状态。湿润锋交汇时,大间距处理与小间距处理相比延迟了湿润锋的交汇时间,故在交汇发生时获得了更大的垂直入渗深度。滴灌结束时,滴头间距大的处理,湿润锋垂直入渗深度浅,水平扩散距离大。这是因为相较于小间距处理,大间距处理会使水分更倾向于横向扩散。通过协调滴头流量与间距,可以主动调控滴灌带布设,以适应不同作物的根系需求。

本研究为室内控制试验,温度、湿度、微生物等因素与田间实际情况存在差异,具有一定局限性。本研究以滴头间距和流量2个变量为条件进行试验,而在大田实际复杂环境下变量较多,控制多变量的线源入渗试验在大田环境下的适用性将是未来研究的重要方向。

4 结论

本研究以新疆额敏灌区砂壤土为试验对象,针对不同滴头间距与不同滴头流量条件,探究线源入渗土壤水分运移规律,得到以下结论:1)不同条件下,水平和垂直方向湿润锋的运移距离均与入渗时间存在良好的幂函数关系,决定系数均大于0.980。2)在滴头间距相同时,滴头流量是主导湿润锋运移的关键因素。流量越大,湿润锋运移速度越快,垂直方向的响应较水平方向更为敏感。大流量处理能显著缩短湿润锋交汇时间至1 min,但其交汇时的垂直入渗深度最浅;至滴灌结束时,大流量处理在垂直方向的最终入渗深度最大。3)在滴头流量相同时,滴头间距是主导湿润锋运移的关键因素。间距越大,湿润锋交汇所需时间越长,且交汇时的垂直入渗深度越大。在滴灌结束时,大间距处理最终形成“宽浅型”湿润体,其水平扩散距离最大,垂直入渗深度最浅;小间距处理则更易形成“深瘦型”湿润体。本研究可为新疆额敏灌区滴灌系统的滴灌带参数设计与优化提供理论依据与参考。

源长度的适用性[J].排灌机械工程学报,39(2):172-178.

范瑞宇,金玉,刘延锋,2021.基于MATLAB GUI的土壤质

- 地类型自动识别系统[J]. 安全与环境工程, 28(2): 142-148+158.
- 费良军, 吴军虎, 王文焰, 等, 2001. 充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J]. 水土保持学报, 15(S1): 137-140.
- 郭宏伟, 徐海量, 赵新风, 等. 塔里木河流域最大灌溉面积与超载情况探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(2): 140-150.
- 何振嘉, 史全乐, 傅渝亮, 等, 2022. 灌水器间距对涌泉根灌双点源交汇入渗水氮运移特性影响研究[J]. 中国农业科技导报, 24(5): 157-169.
- 李耀刚, 蒋存仁, 2021. 滴灌双点源土壤水分入渗特性数值模拟研究[J]. 节水灌溉(1): 33-38.
- 马国荣, 庄溟然, 许德浩, 等, 2024. 青铜峡引黄灌区农田灌溉水入渗与玉米分层吸水规律研究[J]. 干旱区地理, 47(11): 1899-1914.
- 王东旺, 王振华, 张金珠, 等, 2022. 滴灌带布置模式对北疆机采棉生长及土壤水热盐分布特征的影响[J]. 农业工程学报, 38(S1): 76-86.
- 王惠, 王世雷, 王文娥, 等, 2023. 边缝式迷宫滴灌带灌水器流道内泥沙沉积影响因素分析[J]. 农业工程学报, 39(24): 92-99.
- 王世威, 范文波, 马军勇, 等. 基于主成分及信息熵的额敏灌区农业用水特征[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 63(3): 103-112.
- 薛亮, 马忠明, 赵安宇, 等, 2025. 水氮耦合对河西灌区滴灌西瓜 NH_3 和 N_2O 排放的影响[J]. 干旱区地理, 48(5): 801-811.
- 张颢晖, 严海军, 惠鑫, 等, 2023. 移动滴灌系统土壤水分入渗试验与数值模拟[J]. 农业工程学报, 39(6): 158-168.
- 张华东, 周少梁, 李侨, 等, 2024. 不同灌溉方式下旱区枣树根区土壤颗粒组成和孔隙特征[J]. 农业工程学报, 40(24): 98-105.
- 张磊, 孙诗仁, 谢小清, 等, 2024. 额敏县玉米灌溉用水现状及节水灌溉策略[J]. 新疆农业科学, 61(S1): 81-84.
- 张雪晨, 李越, 陈志君, 等, 2022. 膜下滴灌土壤水盐与玉米产量对节水控盐灌溉模式响应的模拟[J]. 农业工程学报, 38(S1): 47-58.
- 张子辉, 赵允格, 谷康民, 等, 2020. 线源入流入渗法在生物结皮渗透性研究中的应用[J]. 水土保持学报, 34(1): 128-134.
- HAN F, ZHENG Y, ZHANG L, et al, 2023. Simulating drip irrigation in large-scale and high-resolution ecohydrological models: From emitters to the basin [J]. *Agric Water Manag*, 289: 108500.
- MAO L, LI Y, HAO W, et al, 2016. An approximate point source method for soil infiltration process measurement [J]. *Geoderma*, 264: 10-16.
- RAN J, SONG Z, ZHANG Q, et al, 2024. Design of a new drip irrigation belt recovery machine with anti breakage function[J]. *Agriculture*, 14(3): 421.
- WANG J, TIAN Z, YANG T, et al, 2024. Characteristics of limited flow and soil water infiltration boundary of a subsurface drip irrigation emitter in silty loam soil [J]. *Agric Water Manag*, 291: 108636.
- YANG P, WU L, CHENG M, et al, 2023. Review on drip irrigation: Impact on crop yield, quality, and water productivity in China[J]. *Water*, 15(9): 1733.

(责任编辑 江 睿)