竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤水分运移特性对比试验研究

范严伟，王延祥，史金红，马亮军，殷伟凡

（兰州理工大学能源与动力工程学院，兰州 730050）

摘要：为探究竖管地表滴灌和普通地表滴灌土壤水分运动规律及区别，在室外同步进行 2 种滴灌模式下风沙土入渗和蒸发试验，对比分析了土壤水分分布、蒸发规律和土壤湿润锋运移特性。结果表明：(1)灌水量为 2 L，2 种滴灌模式下，随着滴头流量的增大，湿润体体积和灌水均匀度逐渐减小，湿润体含水率平均值逐渐增大，当滴头流量一定，竖管地表滴灌的湿润体体积大于普通地表滴灌，而灌水均匀系数小于普通地表滴灌；(2)不同滴头流量处理(0.3，0.4，0.6 L/h)蒸发 7 天结束后，普通地表滴灌土壤蒸发量分别占灌水量的 32.5%，35.0%和 40.0%，而竖管地表滴灌土壤蒸发量仅占灌水量的 22.5%，说明竖管地表滴灌对土壤蒸发有明显的抑制作用；(3)相同灌水量(2 L)时，普通地表滴灌水平和垂直湿润锋运移距离均随滴头流量的增大而略有减小，竖管地表滴灌垂直向下湿润锋运移规律与普通地表滴灌相同，而水平和垂直向上方向运移规律相反；随着时间的延长，普通地表滴灌与竖管地表滴灌水平和垂直方向湿润锋比值均呈不断减小趋势，最后趋于稳定；(4)构建了包括滴头流量和灌水时间在内的普通地表滴灌湿润锋运移距离经验公式，验证所建经验公式的可靠性，均方根误差介于 0.24～0.27 cm，纳什效率系数均大于 0.985。研究结果可为竖管地表滴灌技术应用提供理论参考。

关键词：竖管地表滴灌；普通地表滴灌；水分运移；含水率；蒸发

中图分类号：S152.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)06-0163-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.021

Comparative Experimental Study on Soil Water Transport Characteristics Between Vertiacl Pipe Surface Drip Irrigation and Common Surface Drip Irrigation

FAN Yanwei, WANG Yanxiang, SHI Jinhong, MA Liangjun, YIN Weifan

(*College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050)

Abstract: In order to explore the laws and differences of soil water movement between the vertical-pipe drip irrigation and the common surface drip irrigation, two types of sand infiltration and evaporation tests were carried out simultaneously outdoors. And the distribution of soil water, evaporation regularities and transport characteristics of soil wetting front were compared and analyzed. The results showed that: (1) When the irrigation volume was fixed 2 L, the volume and uniformity of irrigation water gradually decreased with the increasing drip emitter flow, while the average water content of the wetting pattern dimensions gradually increased. When the drip emitter flow was constant, the water content of the wetted body in the vertical-pipe drip irrigation was higher than that in the common surface drip irrigation, while the irrigation uniformity was lower. (2) After 7 days of evaporation, with different drip emitter flow treatments, the soil evaporation of the surface drip irrigation accounted for 32.5%, 35.0% and 40.0% of irrigation amount respectively, while the vertical-pipe drip irrigation only accounted for 22.5%, indicating that the vertical pipe drip irrigation significantly inhibited the soil evaporation. (3) When the irrigation amount was 2 L, the migration distances of wetting fronts of the common surface drip irrigation in horizontal and vertical directions decreased slightly with the increase of drip emitter discharge. In the law of the vertical downward

收稿日期：2022-04-21

资助项目：国家自然科学基金项目(51969013)；甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA225)

第一作者：范严伟(1982—)，男，副教授，主要从事水土资源利用和节水灌溉技术研究。E-mail：fanyanwei24@163.com

通信作者：范严伟(1982—)，男，副教授，主要从事水土资源利用和节水灌溉技术研究。E-mail：fanyanwei24@163.com

movement of vertical surface drip irrigation was similar to the common surface drip irrigation, while the movement in the horizontal and vertical upward directions were opposite. However, with the increase of infiltration time, the transport distance ratios of wetting front in horizontal and vertical direction between common surface drip irrigation and vertical surface drip irrigation showed a decreasing trend and finally tended to be stable. (4) The wetting front migration distance empirical formula, including drip emitter flow and irrigation time, was constructed. And the reliability was verified with the prediction error statistics. That is, the mean square root errors were between 0.24 and 0.27 cm and the Nash efficiency coefficients were greater than 0.985. The research results are expected to provide references for the further researches of vertical pipe drip irrigation.

Keywords: vertical pipe surface drip irrigation; surface drip irrigation; common moisture migration; moisture content; evaporation

肆虐的风沙吞噬着丰饶的土地,带来恶劣的沙尘天气,蚕食着人类的生存空间,导致贫穷和生态移民[1-2]。采取有效的防风固沙措施是应对风沙灾害的必然选择。国内外学者[3-5]对工程固沙、生物固沙、植物固沙和化学固沙等措施的防风固沙效果及物理机理进行了深入的研究,结果表明,在众多固沙措施中,植物固沙是治理沙漠和控制风沙危害最有效、最持久和最具潜力的途径[6-7]。在沙漠化土地上栽植固沙植物幼苗,存在幼苗成活率低、生长缓慢的瓶颈问题,而土壤干旱和地表高温是造成这一问题的关键因素[8-11]。

为了提高固沙植物幼苗栽植成活率,并使其健康成长,范严伟等[12]将地表滴灌技术和管件防护技术有机结合,提出了一种竖管地表滴灌技术。竖管地表滴灌巧妙解决了地表高温和土壤干旱复合胁迫对固沙植物幼苗的伤害,为植物固沙提供了新的技术手段。竖管地表滴灌系统运行时,滴头将水注入防护管件(竖管),在竖管的水平限制和垂向引导下,水流经管内土壤到达管底,通过管底孔向根区土壤运动。由此可见,竖管地表滴灌虽然由地表滴灌发展而来,但灌水模式与普通地表滴灌存在差异。研究发现灌水模式的改变会对土壤入渗和蒸发特性产生重大影响。如 Meshkat 等[13-14]将地表滴灌滴头正下方土壤取出,并用粗砂填充,形成砂管地表滴灌,对比发现,灌水 4 天后,砂管地表滴灌的土壤蒸发量仅占灌水量的 4%,远低于普通地表滴灌的 30%,说明砂管地表滴灌相比于普通地表滴灌可明显减少土壤蒸发。Yanni 等[15]在大田果园内开展了砂管地表滴灌和普通地表滴灌对比试验,结果表明,灌水 14 天后,砂管地表滴灌模式下根层土壤含水量明显高于普通地表滴灌;赵伟霞等[16-17]将砂管地表滴灌中的砂柱改造成上端无侧渗而下端透水的间接地下滴灌,显著减少表层土壤的蒸发损失;孙三民等[18-19]研究了间接地下滴灌模式下密植枣树根区土壤水、盐运移特性,综合考虑节水抑盐效果,确定枣树间接地下滴灌技术参数;谢恒星等[20]通过室内试验对比分析了砂管地表灌滴灌和普通地表滴灌 2 种模式下土壤湿润锋运移规律,结果表明,相同滴头流量情况下,水平向湿润锋普通地表滴灌较大,而垂直向湿润锋砂管地表滴灌较大。

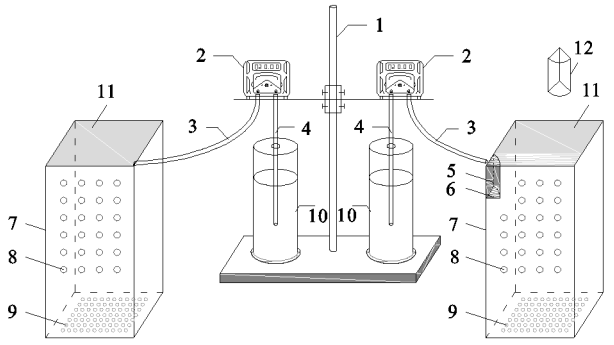
目前,针对竖管地表滴灌的研究工作较少,如能把普通地表滴灌的相关研究成果和竖管地表滴灌进行融合,将极大地丰富竖管地表滴灌的理论基础。因此,开展竖管地表滴灌和普通地表滴灌土壤水分运移特性对比研究是非常有必要的。基于此,本文以竖管地表滴灌和普通地表滴灌为研究对象,当灌水量为 2 L 时,滴头流量分别取 0.3,0.4,0.6 L/h,竖管管径为 15.4 cm,埋深为 15 cm 进行入渗特性试验。以普通地表滴灌试验为对照,滴头流量同竖管地表滴灌试验相一致,通过对比分析 2 种滴灌模式下土壤含水率分布、蒸发规律和湿润锋运移特性,探明两者的差异与联系,以期为竖管地表滴灌的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

2 种滴灌模式下土壤入渗和蒸发试验于 2021 年 6 月 21 日至 7 月 20 日在兰州理工大学室外空旷场地同步开展。试验装置由试验土箱、供水系统和称重装置组成(图 1)。土箱由 10 mm 厚有机玻璃制作,尺寸为 50 cm×50 cm×80 cm(长×宽×高)。箱侧壁按 4 cm 间距布设取土孔(孔径 10 mm),底部预留通气孔(孔径 2 mm),以防气阻发生。供水系统包括蓄水桶、进水管、蠕动泵、出水管和 1/4 竖管(1/4 扇柱体空腔结构)组成,其中 1/4 竖管由有机玻璃管切割而成,尺寸为 7.7 cm×8.0 cm×15 cm(内半径×外半径×高)。试验前按照设定流量调整蠕动泵转速后模拟滴头恒定供水。在试验中取滴灌湿润体的 1/4 为研究对象,竖管地表滴灌入渗试验的滴头置于 1/4 竖管的圆心,普通地表滴灌入渗试验的滴头置于土箱

边壁一角处。称重装置采用量程为 500 kg、精度为 0.05 kg 的电子秤每天记录土箱的质量变化。



注:1 为高度可调节支架;2 为蠕动泵;3 为出水管;4 为进水管;5 为 1/4 竖管;6 为入渗边界;7 为土箱;8 为取土孔;9 为通气孔;10 为蓄水桶;11 为土壤表面;12 为 1/4 竖管细部结构。

图 1　普通地表滴灌和竖管地表滴灌试验装置示意

1.2　试验土壤

试验土样取自甘肃省古浪县八步沙林场的风沙土,取土深度为 0—40 cm。将取得的风沙土经风干、碾压、混合均匀后过 2 mm 筛网后制成备用土样。采用激光粒度仪(MS 2000)测定土样颗粒级配,土壤粒径主要分布在0.02～2.00 mm,占 97.68%,<0.002 mm 仅占 2.32%。土壤干容重为 1.52 g/cm^3,土壤饱和含水率和田间持水量分别为 37.30,23.30 cm^3/cm^3。

1.3　试验方法与测定内容

将试验土样按设定的初始含水率(0.031 cm^3/cm^3)加水,混合均匀后,用塑料薄膜密封静置 1 天。待土壤水分分布均匀后,按设定干容重(1.52 g/cm^3)、层厚(5 cm)装入土箱,层间打毛,使土壤颗粒充分接触。竖管地表滴灌入渗试验土箱待装土到高度至 65 cm 处,将 1/4 竖管埋于土箱边壁一角处(埋深 15 cm),竖管内也需根据设定干容重装土,装土高度与土箱表面持平。普通地表滴灌入渗试验无需埋设竖管,只需装土至土箱表面即可。试验过程中,灌水量统一取 2 L,滴头流量设置为 3 种处理,分别为 0.3,0.4,0.6 L/h。检测指标和计算方法为:

(1)湿润锋运移距离。试验过程中,用马克笔在土箱外壁标记设定时刻土壤湿润锋轮廓线,入渗结束后(历时不同),用钢尺量测湿润锋运移距离。其中,竖管地表滴灌量测 3 个方向(水平、垂直向上和垂直向下)的湿润锋运移距离,垂直向下方向以竖管孔底中心为原点,水平和垂直方向以竖管孔底边壁为原点。地表滴灌量测 2 个方向(水平和垂直向下)的湿润锋运移距离,水平和垂直方向以滴头所在位置为原点。所有量读数据,均取正值。

(2)土壤含水率。灌水结束后,根据土壤湿润体剖面大小,立刻用土钻进行取土,在土箱预留取土孔依次取样,烘干法测定土壤含水率。灌水均匀度采用克里斯琴森均匀系数 C_u 来表示[21]。计算公式为:

$$C_u=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}|\theta_i-\bar{\theta}|}{n\bar{\theta}} \tag{1}$$

式中:C_u 为灌水均匀系数(%);θ_i 为第 i 个取样点的土壤含水率(cm^3/cm^3);$\bar{\theta}$ 为土壤湿润体平均含水率(cm^3/cm^3);n 为取样点个数。

(3)土壤蒸发量。试验期间日平均气温 12.06～23.61 ℃,日最高气温 31.22 ℃(6 月 27 日),日最低气温 4.39 ℃(6 月 20 日)。降雨时对试验土箱进行遮盖,避免降雨对连续蒸发性的影响。土壤蒸发开始后,每天早晨 8:00 称重记录土箱质量,进而转化为标准的土壤蒸发量 E[22]。计算公式为:

$$E=10\times\frac{W_2-W_1}{\rho A} \tag{2}$$

式中:E 为土箱中土壤的日蒸发量(mm);W_2 为前 1 天土箱中土壤的称重质量(g);W_1 为后 1 天土箱中土壤的称重质量(g);ρ 为水的密度,取 1×10^3 g/cm^3;A 为土箱底面积,取 A 为 2 500 cm^2。

1.4　数据处理与分析

采用 Origin 2018 和 Surfer 15.0 软件进行数据处理和绘图,对 2 种滴灌模式下滴头流量对土壤含水率、土壤蒸发量和湿润体特征值的实测数据进行分析。借助指标平均绝对误差、均方根误差和纳什效率系数对经验模型误差进行统计分析[23-24]。统计参数计算方程为:

$$\mathrm{RMSE}=\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-E_i)^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-E_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-O_m)^2} \tag{4}$$

式中:RMSE 和 NSE 分别为平均绝对误差、均方根误差和纳什效率系数;n 为数据总个数;O_i 和 E_i 分别为 i 个观测值和估算值;O_m 为观测值的平均值。RMSE 的数值越接近 0,NSE 的数值越接近 1,表示估算值相对于观测值偏差越小,两者吻合度越高。

2　结果与分析

2.1　竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤含水率分布对比

为了研究不同滴头流量滴灌时所得出湿润体内土壤含水率分布规律,以滴头所在位置为坐标原点,规定原点向下的中心线为 2 种滴灌模式下土壤含水率边界线,根据实测试验数据,分别绘制出不同滴头流量处理下普通地表滴灌(中心线左侧)与竖管地表滴灌(中心线右侧)的体积含水率等值线

对比图(图 2)。

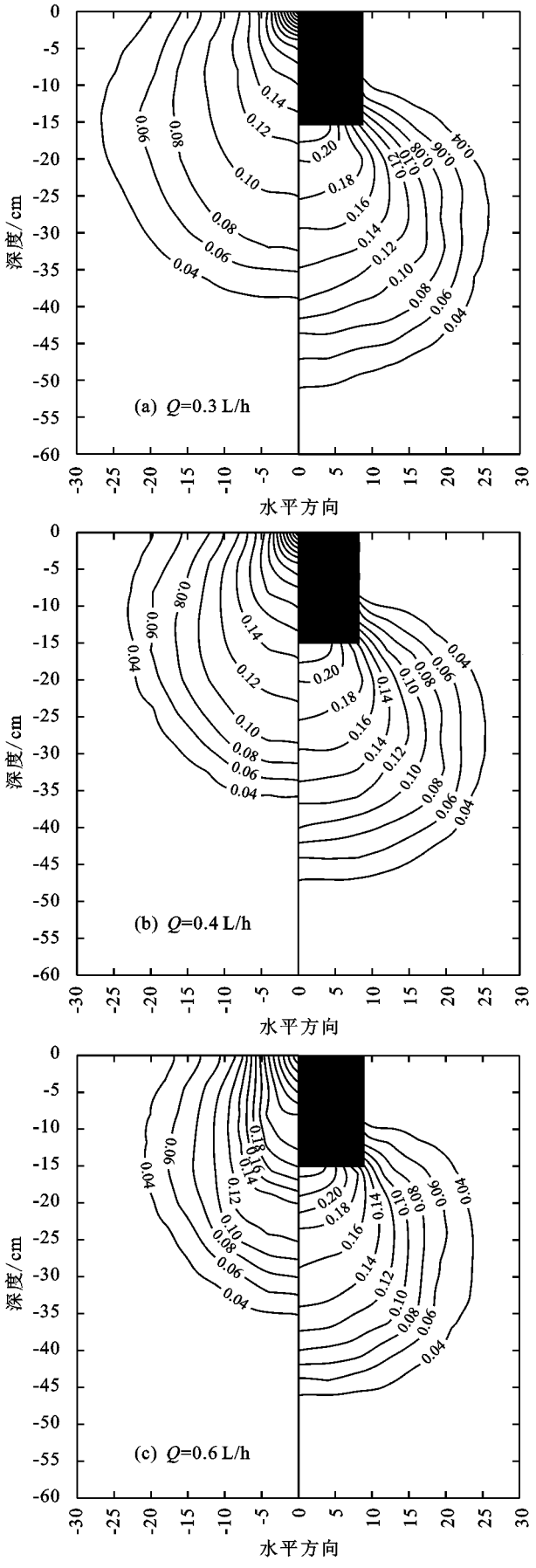


图 2 不同滴头流量处理下竖管地表滴灌与普通地表滴灌的体积含水率等值线对比

由图 2 可知,相同灌水量下,普通地表滴灌模式土壤湿润体体积随滴头流量的增大而减小,0.4,0.6 L/h 滴头流量的湿润体体积比 0.3 L/h 滴头流量分别减少 35.71%和 64.28%。进一步分析发现,随着滴头流量的增大,湿润体含水率平均值逐渐增大,灌水均匀度逐渐减小,3 种滴头流量对应的湿润体平均含水率分别为 8.29%,8.64%和 8.72%,0.4,0.6 L/h 滴头流量的湿润体平均含水率比 0.3 L/h 滴头流量湿润体平均含水率分别增大 0.35%和 0.43%;3 种滴头流量对应的灌水均匀系数分别为 57.12%,47.41%和 37.69%,0.4,0.6 L/h 滴头流量的灌水均匀度比 0.3 L/h 滴头流量分别减少 9.71%和 19.43%。对于竖管地表滴灌滴头流量对湿润体体积、湿润体含水率平均值和灌水均匀度的影响与普通地表滴灌相一致。0.3 L/h 滴头流量湿润体体积达到最大值,3 种滴头流量所对应的湿润体含水率平均值和灌水均匀系数分别为 8.68%,9.19%,9.59%和 41.92%,37.24%,31.39%。

上述仅针对不同滴头流量处理下普通地表滴灌和竖管地表滴灌湿润体体积、湿润体含水率平均值和灌水均匀度进行分析。当滴头流量一定时,竖管地表滴灌的湿润体积和湿润体平均含水率均大于普通地表滴灌,而灌水均匀系数小于普通地表滴灌。竖管地表滴灌湿润体尺寸大于普通地表滴灌湿润体尺寸,滴头流量分别为 0.3,0.4,0.6 L/h 时,竖管地表滴灌垂直入渗深度相比普通地表滴灌远 2.4,1.6,0.4 cm。另外,竖管地表滴灌相对普通地表滴灌湿润体向下平移 10 cm,说明竖管地表滴灌改变传统地表湿润模式,降低土壤表层含水量,增加土壤深层含水量,有利于固沙植物根系向深层土壤的延伸,提高其抗旱性。

2.2 竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤蒸发量对比

在自然条件下,当灌水量一定时,对 3 种滴头流量(0.3,0.4,0.6 L/h)处理下普通地表滴灌和竖管地表滴灌模式下土壤蒸发过程进行对比(图 3)。

由图 3 可以看出,同一滴头流量情况下,竖管地表滴灌的日蒸发量均小于普通地表滴灌,说明竖管地表滴灌对土壤蒸发有明显的抑制作用。蒸发前期(前 4 天),2 种滴灌模式下不同滴头流量处理土壤蒸发量处于波动蒸发阶段,普通地表滴灌日蒸发量均大于竖管地表滴灌日蒸发量,分析主要原因取决于 2 个方面:一是普通地表滴灌土壤表层含水率较高,可满足大气蒸发强度要求;二是受气象因素(气温、辐射、温度和风速)的周期性变化,昼夜蒸发强度不可能维持不变。随着土壤蒸发时间的延长,2 种滴灌模式下的土壤蒸发量趋于稳定,达到 0.2 mm。蒸发 7 天结束

后,不同滴头流量处理(0.3,0.4,0.6 L/h)普通地表滴灌土壤蒸发量分别占灌水量的 32.5%,35.0%和 40.0%,而竖管地表滴灌土壤蒸发量仅占灌水量的 22.5%。

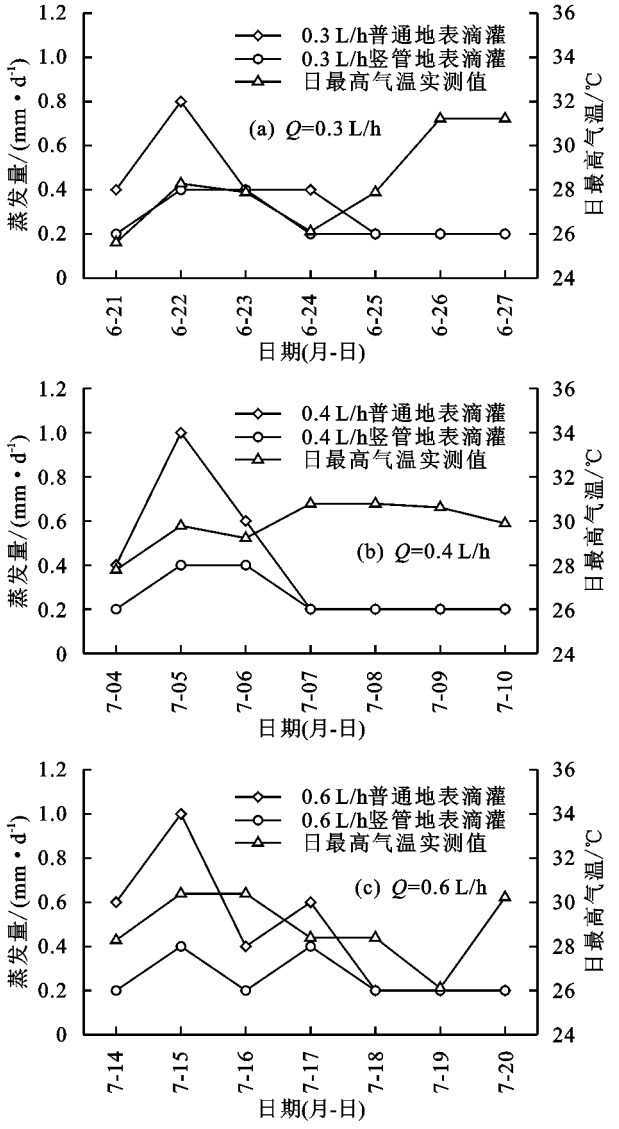


图 3　不同滴头流量处理下竖管地表滴灌与普通地表滴灌的土壤蒸发量对比

2.3　竖管地表滴灌与普通地表滴灌湿润锋运移规律

2.3.1　普通地表滴灌湿润锋运移规律与验证　根据普通地表滴灌入渗试验,获得不同滴头流量(0.3,0.4,0.6 L/h)处理下水平扩散距离和垂直入渗距离随时间的关系曲线(图 4)。

由图 4 可以看出,入渗初期,水平方向和垂直方向湿润锋运移距离均随滴头流量的增大而增大,当灌水量相同(入渗时间不同),不同滴头流量处理下相同方向湿润锋运移距离差异较小。如灌水量为 2 L 时,在水平扩散方向,3 种滴头流量所对应湿润锋运移距离分别为 19.5,19.5,17.8 cm,0.3,0.4 L/h 滴头流量比 0.6 L/h 滴头流量仅增加了 1.7 cm;在垂直入渗方向,3 种滴头流量所对应湿润锋运移距离分别为 38.4,35.2,34.4 cm,0.4,0.6 L/h 滴头流量比 0.3 L/h 滴头流量分别减小 3.2,4.0 cm。在进行滴灌设计,合理选择滴头流量和滴灌历时,量化不同流量情况下湿润锋运移距离与入渗时间的关系,能够为滴灌工程设计与技术应用提供理论依据。假定地表滴灌中各方向湿润锋运移距离(Z_i)与滴头流量(Q)和入渗时间(t)函数关系为[25]:

$$Z_i = kQ^m t^n \tag{5}$$

式中:Z_i为湿润锋运移距离(cm);$i = r$ 或 s,其中 r 为湿润锋水平扩散距离;s 为湿润锋垂直向下入渗距离;Q 为滴头流量(L/h);k、m 和 n 为拟合参数。将不同时间不同方向的湿润锋运移距离与滴头流量的试验数据进行拟合,可构建不同方向湿润锋运移距离(Z_i)的经验公式:

$$Z_r = 14.07Q^{0.17}t^{0.31} \quad R^2 = 0.987 \tag{6}$$

$$Z_s = 23.55Q^{0.33}t^{0.43} \quad R^2 = 0.993 \tag{7}$$

为评价普通地表滴灌湿润锋经验模型的可靠性,选用滴头流量 0.9,1.2 L/h 的试验数据进行验证,分别将经验模型的计算值与实测值进行比较(图 5)。

由图 5 可以看出,湿润锋在不同方向运移距离实测值与模型计算值变化趋势基本一致,进一步利用 t 检验得到垂直入渗距离和水平扩散距离的 p 值,p 值均大于 0.05,说明湿润锋运移距离的经验模型与试验实测值均无显著差异。采用统计指标 RMSE 和 NSE 对经验模型进行误差分析,结果表明,RMSE 介于 0.24～0.27 cm,NSE 均大于 0.985,表明普通地表滴灌湿润锋运移距离模型预测效果良好。

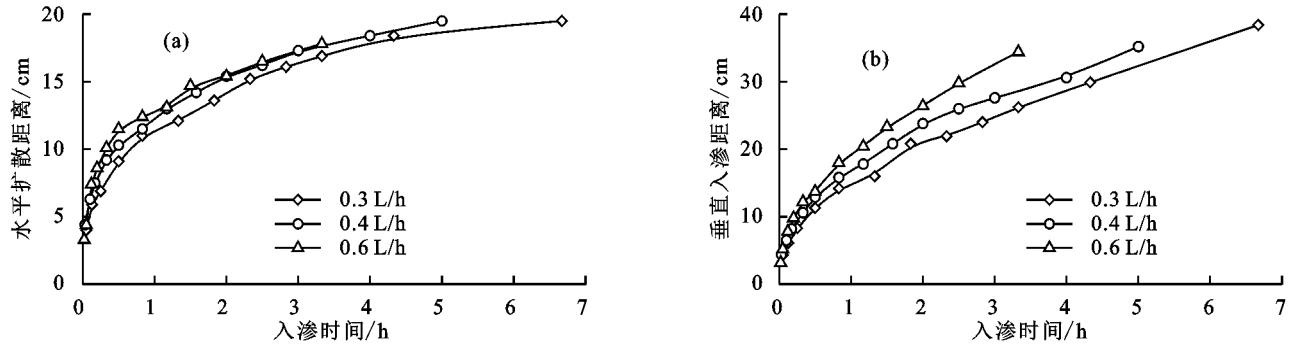


图 4　普通地表滴灌不同滴头流量下湿润锋随时间的变化过程

2.3.2 竖管地表滴灌湿润锋运移规律 根据竖管地表滴灌入渗试验，当竖管管径(15.4 cm)和埋深(15 cm)一定，不同滴头流量(0.3，0.4，0.6 L/h)处理下不同方向湿润锋运移距离随时间的关系曲线(图 6)。

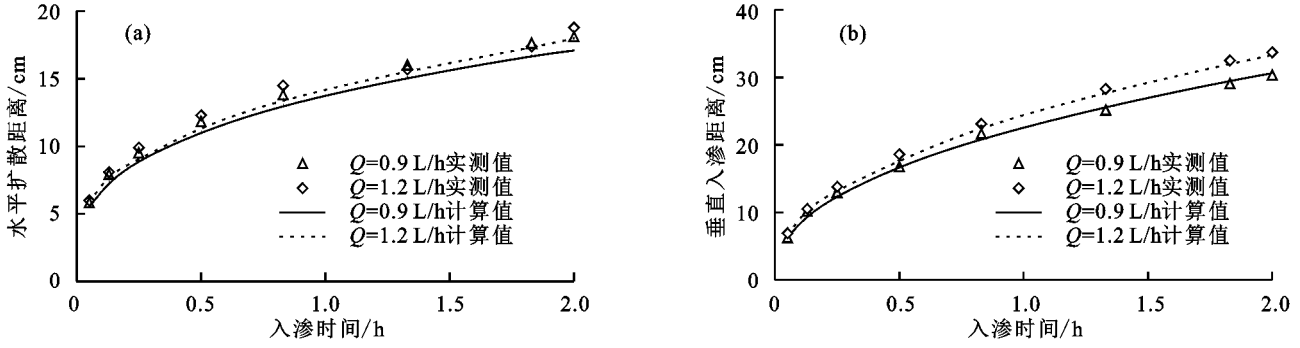


图 5 经验模型计算值与试验实测值对比

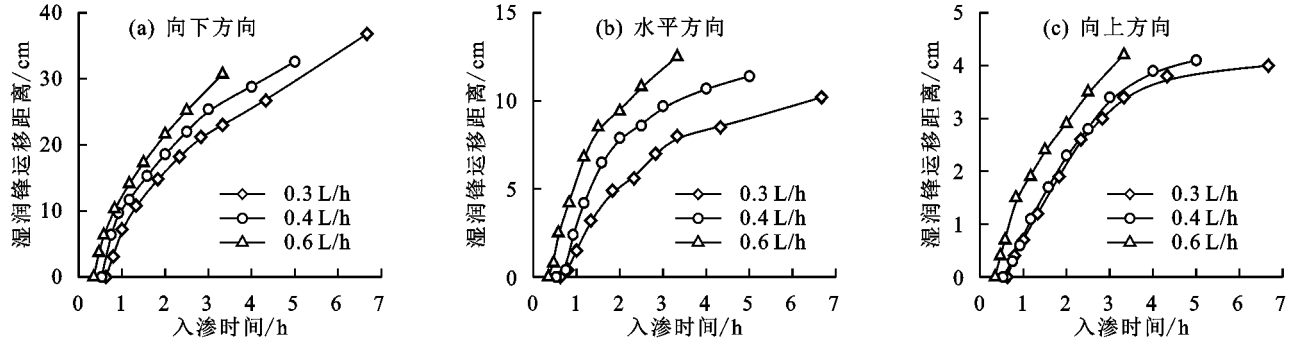


图 6 竖管地表滴灌土壤湿润锋运移距离与入渗时间关系曲线

由图 6 可知，当灌水量相同，管径和埋深一定时，大滴头流量短时间内不同方向湿润锋运移距离较小滴头流量更远，但随灌水时间的延长，垂直向下湿润锋运移距离随着滴头流量的减小而增大，而水平和垂直向上随着滴头流量的增大而增大，但变幅很小。整个入渗过程中，湿润锋运移距离始终符合垂直向下＞水平方向＞垂直向上的变化规律。在垂直向下方向，灌水结束后(6.66，5.00，3.33 h)，0.3，0.4 L/h 滴头流量相比 0.6 L/h 滴头流量分别增加 11.42% 和 16.57%；在水平方向，0.4 和 0.6 L/h 滴头流量相比 0.3 L/h 滴头流量分别增加 11.8% 和 22.5%；在垂直向上方向，0.4，0.6 L/h 滴头流量相比 0.3 L/h 滴头流量分别增加 2.5% 和 5.0%。已有文献[12]研究表明，竖管地表滴灌湿润锋运移距离与滴头流量、竖管直径、竖管埋深、灌水时间能较好地用幂函数连乘关系。该函数关系式表示为：

$$W_s=\lambda_1 Q^{0.42}D^{-0.23}B^{-0.18}(t-t_0)^{0.53} \quad (8)$$

$$W_r=\lambda_2 Q^{0.17}D^{-0.63}B^{-0.01}(t-t_0)^{0.60} \quad (9)$$

$$W_u=\lambda_3 Q^{0.08}D^{-0.90}B^{-0.41}(t-t_0)^{0.59} \quad (10)$$

式中：W_s 为垂直向下湿润锋运移距离(cm)；W_r 为水平方向湿润锋运移距离(cm)；W_u 为垂直向上方向湿润锋运移距离(cm)；Q 为蠕动泵流量(L/h)；D 为竖管管径(cm)；B 为竖管埋深(cm)；t 为入渗时间(h)；λ_1、λ_2 和 λ_3 为待定参数；t_0 为灌溉水到达竖管孔底所需时间(h)；其中，t_0 计算式为 $t_0=0.001V(\theta_m-\theta_i)/Q$，$V$ 为 1/4 竖管湿润体内土体体积量，取 698.14 cm^3；θ_m 为竖管内土体平均体积含水率，取 0.312 cm^3/cm^3；θ_i 为管内土体湿润体初始体积含水率，取 0.031 cm^3/cm^3。

采用公式(8～10)拟合滴头流量分别取 0.3，0.4，0.6 L/h，管径为 15.4 cm，埋深为 15 cm 时，竖管地表滴灌在不同方向的湿润锋运移距离试验数据，获得 $\lambda_1=66.68$、$\lambda_2=24.33$ 和 $\lambda_3=8.64$，进而可得到 W_s、W_r 和 W_u 的计算式：

$$W_s=66.68Q^{0.42}D^{-0.23}B^{-0.18}(t-t_0)^{0.53} \quad R^2=0.982 \quad (11)$$

$$W_r=24.33Q^{0.17}D^{-0.63}B^{-0.01}(t-t_0)^{0.60} \quad R^2=0.911 \quad (12)$$

$$W_u=8.64Q^{0.08}D^{-0.90}B^{-0.41}(t-t_0)^{0.59} \quad R^2=0.944 \quad (13)$$

文中所构建普通地表滴灌和竖管地表滴灌湿润锋运移距离预测模型具有较高精度，可为风沙土在农业生产中滴灌设计和应用提供指导。需要强调说明的是文中预测模型是根据古浪地区风沙土所试验资料而建，由于土壤空间变异性的存在，土壤质地结构对湿润锋运移距离有较大的影响，对于不同沙漠地区的风沙土，文中所建预测模型系数还需修正。

2.3.3 普通地表滴灌与竖管地表滴灌湿润锋随时间的对比分析 在 0.3，0.4，0.6 L/h 滴头流量处理下，

普通地表滴灌和竖管地表滴灌在水平和垂直方向的湿润锋运移距离随时间变化见图 7 和图 8。

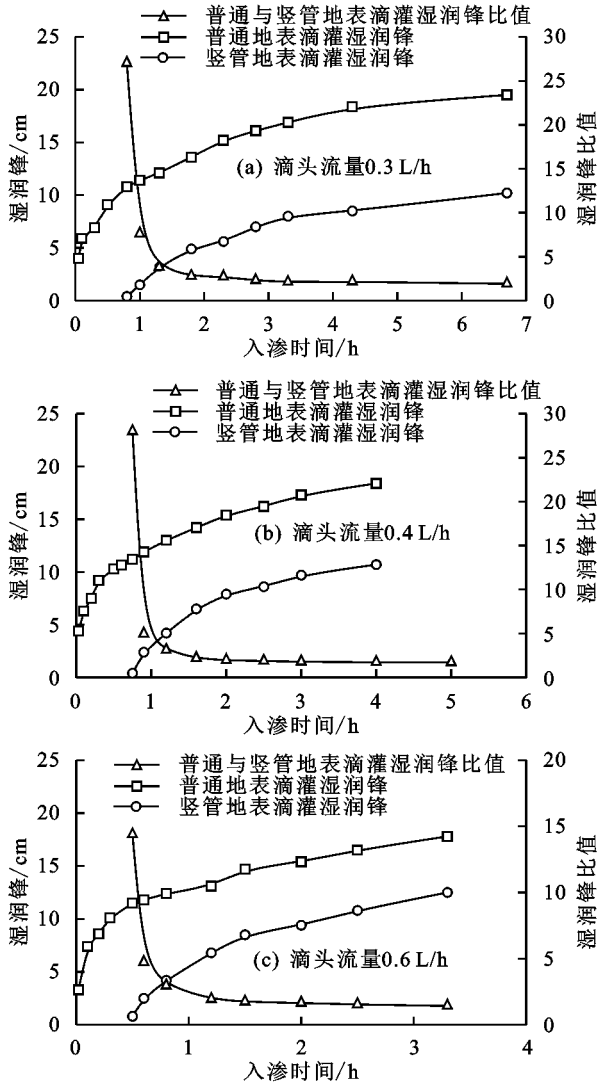


图 7　不同滴头流量下水平湿润锋随时间的变化过程

由图 7 可知,竖管地表滴灌和普通地表滴灌的水平湿润锋运移距离均随时间的增大而增大,但普通地表滴灌的水平湿润锋运移距离始终大于竖管地表滴灌。在入渗初期(前 0.6 h),普通地表滴灌斜率相对较大,说明相比竖管地表滴灌水平湿润锋扩散速率更快。主要原因是入渗的初期,对于竖管地表滴灌而言,不同滴头流量处理,灌溉水先在管内做一维垂直入渗,到达管底孔后(不同滴头流量处理到达孔底的时间分别为 0.6,0.5,0.3 h)很少量的水分通过底孔向水平方向扩散,而普通地表滴灌在垂直入渗的同时水平方向也在扩散,所以普通地表滴灌与竖管地表滴灌湿润锋比值要大。随着入渗时间的增加,2 种滴灌模式下水平湿润锋的比值基本不变,约为 1.68。

由图 8 可知,入渗初始阶段普通地表滴灌湿润锋运移距离明显大于竖管地表滴灌,随着入渗时间的延长,两者湿润锋运移距离存在明显交点,这是因为竖管地表滴灌土壤水分入渗到达孔底后,竖管引导土壤水分垂直向下入渗。灌水结束后,竖管地表滴灌与普通地表滴灌垂直湿润锋比值分别为 0.94,0.96 和 0.99,其平均为 0.96。

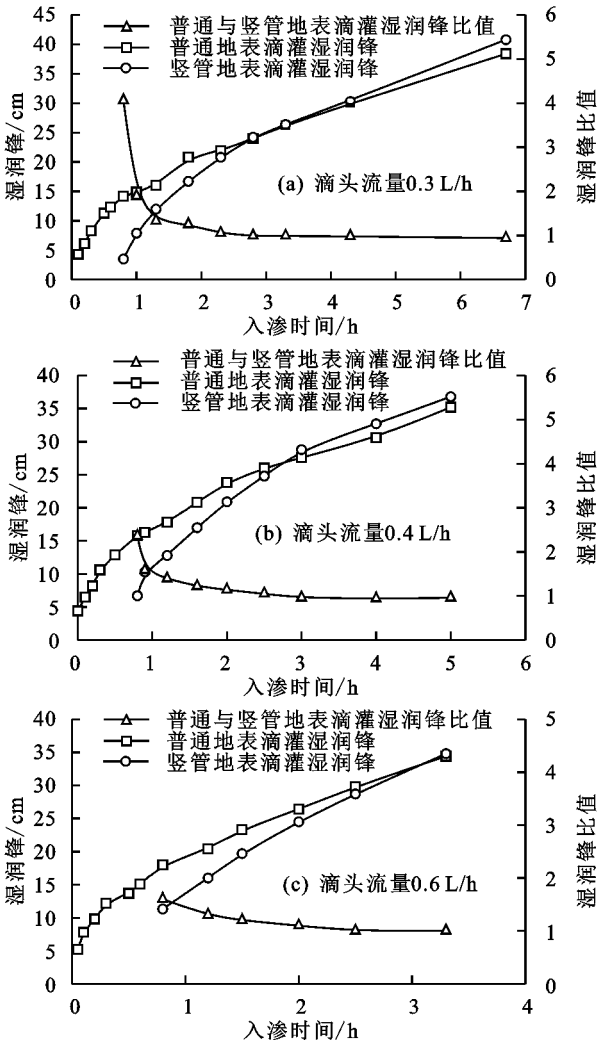


图 8　不同滴头流量下垂直湿润锋随时间的变化过程

3　结 论

(1)当灌水量一定,2 种滴灌模式下,随着滴头流量的增大,湿润体体积和灌水均匀度逐渐减小,湿润体含水率平均值逐渐增大;相同滴头流量下,竖管地表滴灌的湿润体体积大于普通地表滴灌,而灌水均匀系数略小于普通地表滴灌。

(2)在相同灌水量和滴头流量处理下,连续蒸发 7 天结束后,普通地表滴灌土壤蒸发量分别占灌水量的 32.5%,35.0%和 40.0%,而竖管地表滴灌土壤蒸发量仅占灌水量的 22.5%,说明竖管地表滴灌对土壤蒸发有明显的抑制作用。

(3)相同灌水量条件下,普通地表滴灌,不同滴头流量处理相同方向湿润锋运移距离相接近,而竖管地表滴灌条件下,管径和埋深一定时,垂直向下湿润锋运移距离随着滴头流量的减小而增大,水平和垂

直向上方向随着滴头流量的增大而增大，但差异较小；构建了包括滴头流量和灌水时间在内的普通地表滴灌湿润运移距离经验公式，验证所建经验公式的可靠性，均方根误差介于 0.24～0.27 cm，纳什效率系数均大于 0.985。

(4)在相同灌水量和滴头流量处理下，普通地表滴灌水平方向湿润锋运移距离始终大于竖管地表滴灌，而垂直方向两者湿润锋运移距离存在明显交点，随着入渗时间的增加，两者之间湿润锋比值呈不断下降趋势，最后保持恒定不变。

参考文献：

[1] Middleton N J. Desert dust hazards: A global review [J].Aeolian Research,2017,24:53-63.

[2] Duan H C, Wang T, Xue X, et al. Dynamics of aeolian desertification and its driving forces in the Horqin Sandy Land, Northern China[J].Environmental Monitoring and Assessment,2014,186(10):6083-6096.

[3] 王涛.中国风沙防治工程[M].北京:科学出版社,2011.

[4] 李生宇,雷加强,徐新文,等.中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J].中国科学院院刊,2020,35(6):665-674.

[5] Breckle S W, Veste M, Wucherer W. The role of biological soil crusts on desert sand dunes in the Northwestern Negev, Israel[J].Springer Berlin Heidelberg, 2001,38:357-367.

[6] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.

[7] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J].Science China,2014,57(5):539-548.

[8] 麻浩,张桦,马林,等.无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术及其示范推广[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):248-256.

[9] Li X R, Zhang Z S, Huang L, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China[J].Chinese Science Bulletin,2013,58(13):1483-1496.

[10] Bita C E, Gerats. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops[J].Frontiers in Plant Science,2013,4:1-17.

[11] Yu T, Ren C, Zhang J, et al. Effect of high desert surface layer temperature stress on *Haloxylon ammodendron* (C.A. Mey.) Bunge[J].Flora,2012,207(8):572-580.

[12] 范严伟,王延祥,朱鹏程,等.竖管地表滴灌下风沙土稳定入渗率与湿润体估算模型[J].农业工程学报,2021,37(7):103-111.

[13] Meshkat M, Wamer R C, Workman S R. Comparison of water and temperature distribution profiles under sand tubeirrigation [J]. Transactions of the ASAE, 1998,41(6):1657-1663.

[14] Meshkat M, Warner R C, Workman S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface and sand tube irrigation[J].Transactions of the ASAE,2000,43(1):79-86.

[15] Yanni S, Nimah M N, Bashour I. Gravel vertical mulching for improving water use efficiency of drip irrigated orchards [J].Acta Horticulturae,2004,664:673-681.

[16] 赵伟霞,张振华,蔡焕杰,等.间接地下滴灌导水装置规格参数模型研究[J].灌溉排水学报,2009,28(1):5-9.

[17] 赵伟霞,张振华,蔡焕杰,等.间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J].农业工程学报,2010,26(4):87-92.

[18] 孙三民,安巧霞,蔡焕杰,等.枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J].农业机械学报,2015,46(1):160-169.

[19] 孙三民,安巧霞,杨培岭,等.间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J].农业机械学报,2016,47(8):81-90.

[20] 谢恒星,张振华,冯雪.沙管滴灌水分运移关键参数初探[J].水土保持研究,2007,14(3):112-114.

[21] 张国祥,申丽霞,郭云梅.微润灌溉条件下土壤质地对水分入渗的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(7):35-39.

[22] 原翠萍,张心平,雷廷武,等.砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J].农业工程学报,2008,24(7):25-28.

[23] Willmott, Cort J. Some comments on the evaluation of model performance[J].Bulletin of the American Meteorological Society,1982,63(11):1309-1369.

[24] 范严伟,杨志伟,胡五龙.均质土微润灌湿润体模型构建及验证[J].农业工程学报,2020,36(13):83-91.

[25] 白丹,孙淑贞,任培琦,等.地下灌竖管灌水器湿润体时空变化规律[J].农业工程学报,2018,34(7):107-113.