

低压毛管渗灌器水分运移特性研究初报^{*}

马小刚¹, 张维江^{1,2}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 西北退化生态系统恢复与重建省部共建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘 要:通过室内渗灌模拟试验,对低压毛管渗灌器在沙地土壤中水分入渗试验资料进行分析,结果表明:入渗率与入渗时间呈幂函数关系,而累积入渗量与入渗时间呈对数函数关系。湿润体近似于椭球体,并且水平扩散半径大于垂直入渗深度,椭球体的长轴在水平扩散方向左右对称,短轴在垂直入渗方向,上下不对称,且上短下长。

关键词:低压毛管渗灌器;水分运移;入渗率

中图分类号:S275

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)06-0153-04

Preliminary Study of Low-voltage Capillary Infiltration Irrigation on the Water Migration Characteristics

MA Xiao-gang¹, ZHANG Wei-jiang^{1,2}

(1. College of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. The Ministry of Education Priority Laboratory of Northwest Degenerate Ecosystem Recover and Reconstruct, Yinchuan 750021, China)

Abstract Based on the analysis of low-pressure capillary irrigation infiltration simulation test in sandy soil water, the results showed that infiltration rate and the infiltration of time showed the power function relationship, and the accumulated volume of infiltration and infiltration time was a function of the number. Moist body similar to ellipsoid, and the spread of the level of infiltration radius is greater than the vertical depth, ellipsoid level of proliferation in the long axis direction was symmetrical, in the short axis vertical infiltration direction, from top to bottom asymmetry, and short on the next chief.

Key words low-voltage capillary infiltration irrigation; water movement; infiltration rate

宁夏河东沙地地处内陆干旱地区,气候干燥,年降水量少而蒸发量大,水资源短缺,植树造林难、成活率低。但沙地表层土壤具有强透水性能和地表干沙层具有阻滞蒸发的特点,研究开发适合沙地林木的地下渗灌系统,通过适量利用沙地有限的水资源,维持林木在干旱季节和干旱年份的正常生理活动,增加林木的生物产量,提高沙地造林成活率。地下渗灌,简言之,就是将渗灌器直接埋入土壤作物根部给作物实施供水,减少蒸发降低深层渗漏,提高水分利用率。在室内对地下渗灌条件下沙地土壤水分运移特性的研究,是在沙地中利用地下渗灌技术开展植树造林的前提^[1-4]。

1 试验材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自宁夏河东沙地,为沙壤土,土壤机械组成见表1。饱和含水量和田间持水量分别为20.8%和7.12%。试验前将风干土壤过2 mm孔径细筛,按照设计容重($\rho = 1.450 \text{ kg/m}^3$)分层装入试验土箱内,土壤初始含水率为0.3%。

渗灌模拟试验设备由低压毛管渗灌器(以下简称“渗灌器”)、试验土箱和供水系统组成。试验用渗灌器采用宁夏大学张维江教授发明并已获得国家专利的“低压毛管渗灌器”(专利号:ZL200620099911.5)进行,具体形式见图1。渗灌器型号定名SW \times y-z,其中:x代表渗灌器内芯规格,目前有C、D、E、F四种规格;y代表渗灌器长度,设计了1.0、1.5、1.75、2.0 m四种长度;z代表加压水头,设计了0.5、0.8、1.0、1.25、1.5 m五种水头。试验土箱采用矩形结构,由3 mm厚钢板加工而成,其规格为50 cm \times 50 cm \times 60 cm(长 \times 宽 \times 高)。本次试验用马氏瓶供水,马氏瓶尺寸为5 cm \times 5 cm \times 50 cm(长 \times 宽 \times 高)和5 cm \times 10 cm \times 50 cm(长 \times 宽 \times 高)两种,在恒定水头下通过调节旋钮开关控制流量,具体试验设备见图2。

1.2 试验方法

将供试土壤风干过筛,按设计容重($\rho = 1.450 \text{ kg/m}^3$)分层均匀装入试验土箱内(每层厚度10 cm)。将渗灌器出口置于土面以下20 cm处,渗灌器内芯伸出渗灌管口10 cm。试验开始后,用秒表计时并观测土壤水分入渗量,观测时间

^{*} 收稿日期:2008-05-17

基金项目:宁夏回族自治区科技公关计划项目“河东沙地灌木林水分高效利用及生命维持系统研究与示范”(05GG10703);国家林业局科技支撑计划项目“半干旱区沙地水土资源优化配置与高效利用技术研究”(2006BAD26B0702)

作者简介:马小刚(1981-),男,宁夏固原人,在读硕士研究生,研究方向为旱区水土资源调控。E-mail:nxdxmxg@126.com

通信作者:张维江(1963-),男,宁夏海原人,教授,博士生导师,主要从事干旱地区水土资源调控研究工作。E-mail:zwjiang@263.net

分别为 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 240, 360, 510 min。取入渗形成的土壤湿润体的 1/2 观测特征尺寸。选取 3 套

相同规格的渗灌器作平行试验,取其平均值进行分析。湿润体特征尺寸见图 3,采用烘干法测定土壤含水量。

表 1 河东沙地土壤机械组成

%

深度/cm	1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	< 0.001 mm	< 0.01 mm
0 - 10	48.82	35.83	2.92	0.26	2.82	8.99	12.07
10 - 20	45.38	31.56	2.74	1.92	1.98	16.42	20.32
20 - 40	41.50	54.30	1.16	0.19	0.43	2.42	3.04
40 - 60	39.78	56.48	1.14	0.49	0.39	1.72	2.60

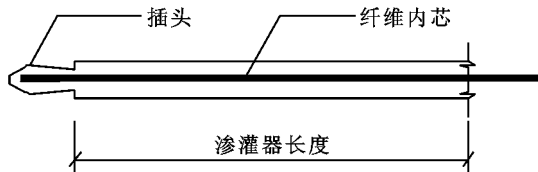


图 1 低压毛管渗灌器

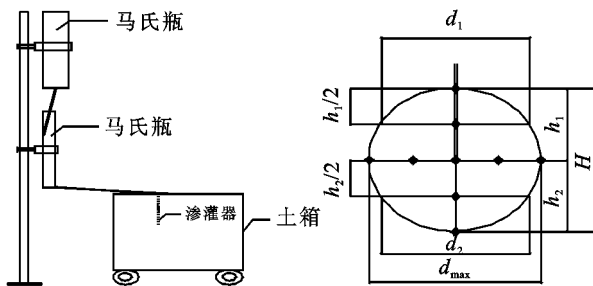


图 2 试验装置图

图 3 湿润体特征值示意图

2 试验结果与分析

2.1 入渗率变化过程分析

(1) 图 4 - 6 给出了不同加压水头、内芯规格、长度条件下入渗率曲线。可以看出:入渗率随着入渗时间的延长而减小;入渗时间相同时,不同加压水头时的入渗率随着加压水头的增大而增加,不同内芯规格时的入渗率随着内芯规格由 C 到 F 而减小,不同长度时的入渗率随着长度的增大而减小。

(2) 入渗率曲线的变化过程可分为两个阶段:第一阶段,在 0~100 min 之间曲线呈单调递减。随着入渗时间不断延长,入渗率在不断降低,但此阶段入渗率的降低幅度大于入渗时间的增加幅度,曲线较为陡直。第二阶段,从 100 min 后直至试验结束这段时间。随着入渗时间继续不断延长,入渗率仍然在不断降低,但此阶段入渗率的降低幅度小于入渗时间的增加幅度,曲线变的相对平缓,最后逐渐趋于一稳定数值。产生这种结果的原因是入渗开始时,由于渗灌器出水口处周围的含水率梯度 $\frac{\partial \theta}{\partial r}$ 的绝对值很大,入渗率 $i(t)$ 亦很高。

随着入渗的进行,含水率梯度 $\frac{\partial \theta}{\partial r}$ 的绝对值不断减小,入渗率 $i(t)$ 也随之逐渐降低。当入渗进行到一定时间后,入渗率趋于一稳定值。

(3) 对试验资料进行回归分析得出:入渗率与入渗时间呈 $i(t) = Kt$ 幂函数关系,式中: $i(t)$ ——入渗率 (cm/min); t ——入渗时间; K ——入渗系数,见表 2。

2.2 累积入渗量变化过程分析

(1) 图 7 - 9 给出了不同加压水头、内芯规格、长度条件下入渗时的累积入渗量曲线。可以看出:入渗时的累积入渗

量随着入渗时间的延长而增大;入渗时间相同时,不同加压水头时的累积入渗量随着加压水头的增大而增加,不同内芯规格时的累积入渗量随着内芯规格由 C 到 F 而减小,不同长度时的累积入渗量随着长度的增大而减小。

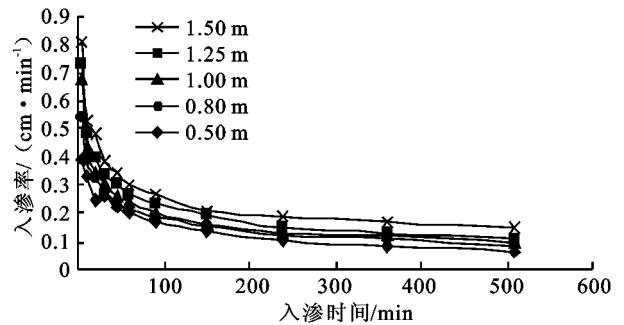


图 4 不同加压水头入渗率曲线

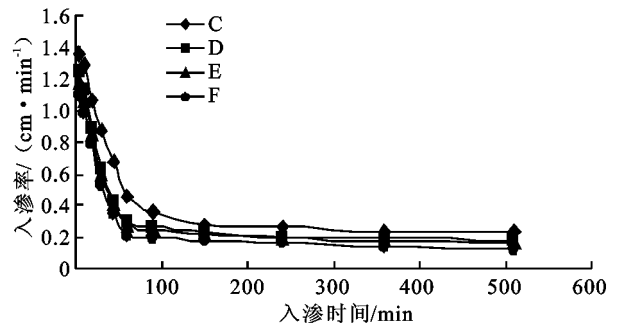


图 5 不同芯规格入渗率曲线

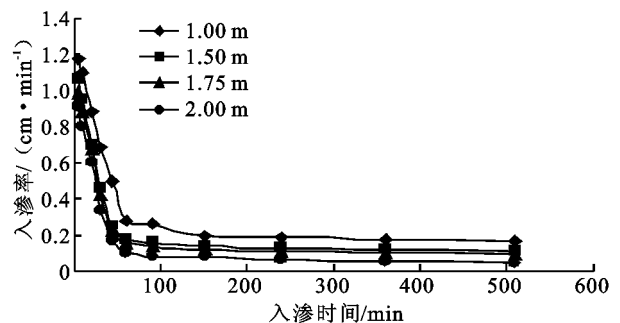


图 6 不同长度入渗率曲线

(2) 累积入渗量曲线的变化过程也可分为两个阶段:第一阶段,在 0~100 min 之间曲线呈单调递增。随着入渗时间不断延长,累积入渗量也在不断增大,但此阶段的累积入渗量的增加幅度大于入渗时间的增加幅度,曲线较为陡直。第二阶段,从 100 min 后直至试验结束这段时间。随着入渗时间继续不断延长,累积入渗量仍然在不断增大,但此阶段的累积入渗量的增加幅度小于入渗时间的增加幅度,曲线变的相对平缓,最后逐渐趋于一稳定数值。产生这种结果的原因是入渗

开始时, 由于渗灌器出水口处周围的含水率梯度 $\frac{\partial \theta}{\partial r}$ 的绝对值很大, 入渗率 $i(t)$ 很高, 导致累积入渗量很大。随着入渗的进行, 含水率梯度 $\frac{\partial \theta}{\partial r}$ 的绝对值不断减小, 入渗率 $i(t)$ 也随之逐渐降低, 累积入渗量增大幅度逐渐变小。当入渗进行到一定时间后, 入渗率趋于一定稳定值, 则累积入渗量也趋于稳定。

表 2 土壤入渗率曲线回归分析表

规格	K	R^2
1.5 m 加压水头	3.7863	- 0.4426
1.0 m 加压水头	3.1018	- 0.4774
0.5 m 加压水头	2.7262	- 0.5363
SW _D - 1.0	3.4154	- 0.4578
SW _E - 1.0	2.9107	- 0.4817
SW _F - 1.0	2.7427	- 0.4797
SW _D - 1.0	3.0447	- 0.4979
SW _D - 1.5	2.7172	- 0.5602
SW _D - 2.0	2.7661	- 0.5933

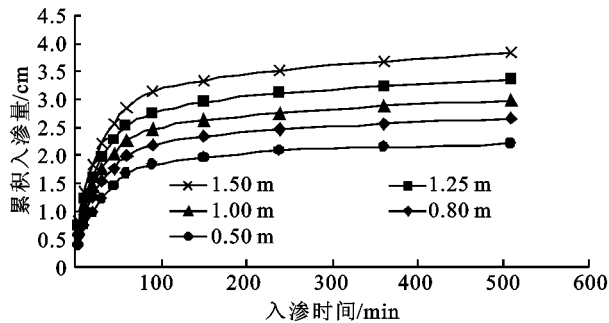


图 7 不同加压水头累积入渗量曲线

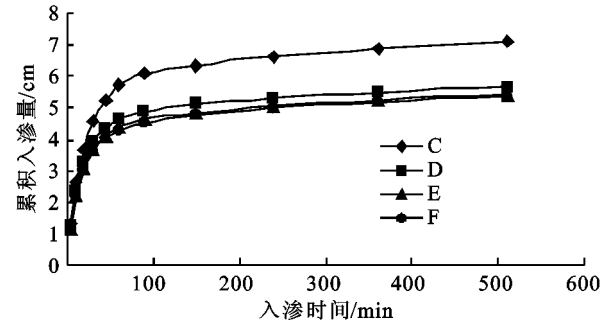


图 8 不同内芯规格累积入渗量曲线

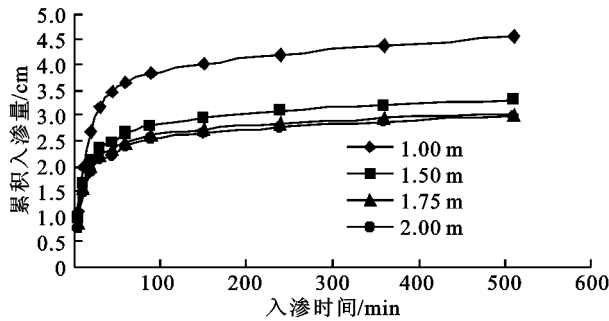


图 9 不同长度累积入渗量曲线

(3) 对试验资料进行回归分析得出: 累积入渗量与入渗时间呈 $I(t) = K \ln(t) +$ 对数函数关系, 式中: $I(t)$ ——累积入渗量 (cm); t ——入渗时间; K , ——入渗系数, 见表 3。

表 3 土壤累积入渗量曲线回归分析表

规格	K	R^2
1.5 m 加压水头	1.3553	0.3283
1.0 m 加压水头	1.1057	0.3071
0.5 m 加压水头	0.9762	0.2749
SW _D - 1.0	1.2923	0.3107
SW _E - 1.0	1.2313	0.2790
SW _F - 1.0	1.1609	0.2802
SW _D - 1.0	1.0790	0.2595
SW _D - 1.5	0.9406	0.2252
SW _D - 2.0	0.8937	0.2193

2.3 湿润体形状及其影响因素分析

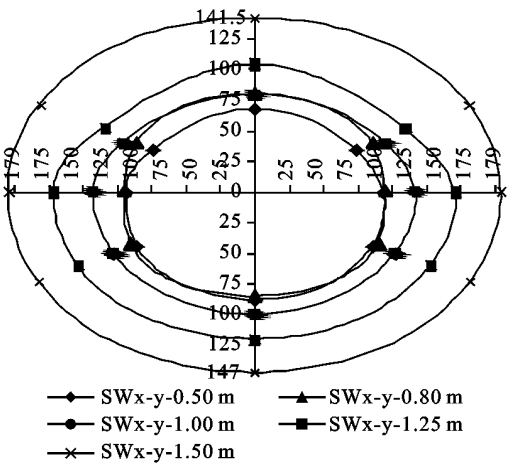


图 10 不同加压水头入渗湿润体形状

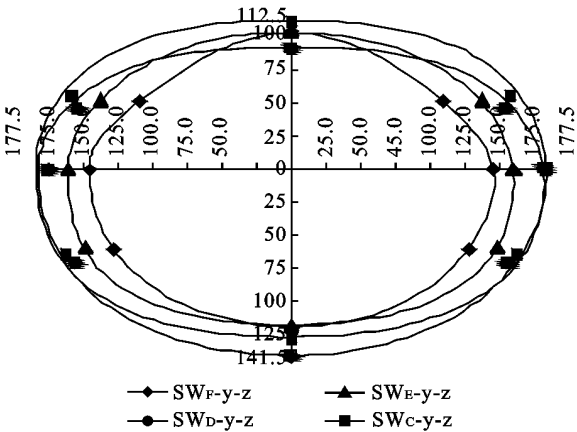


图 11 不同内芯规格入渗湿润体形状

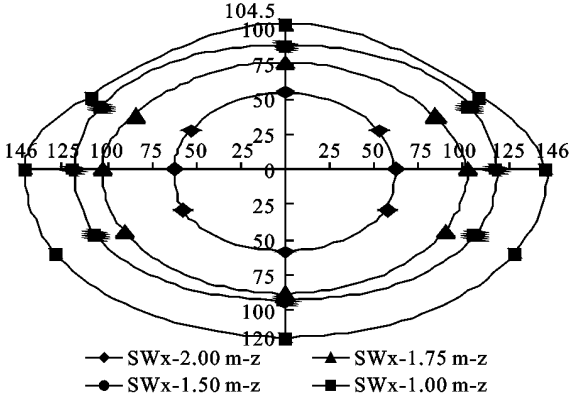


图 12 不同渗灌器长度入渗湿润体形状

(1) 入渗湿润体形状。图 10-12 表示渗灌器在不同加压水头、内芯规格和长度条件下沙地土壤入渗 510 min 时实测的湿润体形状。对于非饱和土壤水, 当不考虑溶质势 ψ_s 、温度势 ψ_r 以及气压势 ψ_p 时, 任一点的土水势只包括重力势 ψ_g 和基质势 ψ_m 。由于土壤特性的空间变异性, 土水势中的基质势 ψ_m 又可分为在水平扩散方向的分量 ψ_{mx} 和在垂直入渗方向的分量 ψ_{my} 。若以单位重量的土壤水计, 水势单位用水头表示 (单位为 cm), 非饱和土壤水的总水头就等于位置水头和基质势水头 (或称负压水头) 之和。湿润体内的土壤水在水平扩散方向的水分运动只受到基质势分量 ψ_{mx} 的作用, 而垂直入渗方向除受基质势分量 ψ_{my} 的作用外, 还受到重力势 ψ_g 的作用。基质势 ψ_m 取决于土壤的干湿程度, 重力势 ψ_g 取决于相对参考平面的高度。由图 3 以及图 10-12 可知: 对于入渗湿润体而言, 以渗灌器出水孔处 (图 10-12 中的 o 点) 为原点, 基质势 ψ_m 在水平扩散方向的分量 ψ_{mx} 大小等于 $d_{\max}/2$, 在垂直入渗方向的分量 ψ_{my} 大小等于 $(h_1 + h_2)/2$, 重力势 ψ_g 大小等于 $(h_2 - h_1)/2$ 。试验结果发现: ψ_{mx} (1.0 ~ 1.5) ψ_{my} ; ψ_{my} (4.0 ~ 14.5) ψ_g , 由此可知, $\psi_{mx} > \psi_{my} > \psi_g$ 。入渗过程中土壤水在 ψ_{mx} 、 ψ_{my} 以及 ψ_g 的共同作用下, 试验结果如图 10-12 所示, 得到的湿润体近似于椭球体, 并且水平扩散半径大于垂直入渗深度, 椭球体的长轴在水平扩散方向, 呈左右对称, 短轴在垂直入渗方向, 上下不对称, 且上短下长。

(2) 影响因素分析。湿润体的形状主要取决于入渗时的累积入渗量, 而累积入渗量又与渗灌器的加压水头、内芯规格和长度有关。不同加压水头时的入渗湿润体体积最大, 其次是不同内芯规格, 再次是不同长度。产生这样的结果是因为影响累积入渗量因素的作用大小为: 加压水头 > 内芯规格 > 渗灌器长度, 所以导致不同加压水头时的累积入渗量 > 不同内芯规格时的累积入渗量 > 不同长度时的累积入渗量, 因此会出现图 10-12 所表现出的湿润体形状。

3 结论

(1) 入渗率随着入渗时间的延长而减小。入渗时间相同时, 不同加压水头的入渗率随着加压水头的增大而增加, 不同内芯规格的入渗率随着内芯规格由 C 到 F 而减小, 不同长度的入渗率随着长度的增大而减小。对试验资料进行回归分析得出: 入渗率与入渗时间呈 $i(t) = Kt$ 幂函数关系。

(2) 入渗时的累积入渗量随着入渗时间的延长而增大; 入渗时间相同时, 不同加压水头的累积入渗量随着加压水头的增大而增加, 不同内芯规格的累积入渗量随着内芯规格由 C 到 F 而减小, 不同长度的累积入渗量随着长度的增大而减小。对试验资料进行回归分析得出: 累积入渗量与入渗时间呈 $I(t) = K \ln(t) +$ 对数函数关系。

(3) 不同加压水头时的入渗湿润体体积最大, 不同内芯规格时的入渗湿润体体积次之, 不同长度时的入渗湿润体体积最小。湿润体近似于椭球体, 并且水平扩散半径大于垂直入渗深度, 椭球体的长轴在水平扩散方向, 呈左右对称, 短轴在垂直入渗方向, 上下不对称, 且上短下长。

参考文献:

- [1] 张维江. 盐池沙地水分动态及区域荒漠化特征研究 [M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2004: 1-160.
- [2] 冯广志. 对“渗灌”的几点看法 [J]. 中国农村水利水电, 1997(7): 5-6.
- [3] 刘晓英, 杨振刚, 王天俊. 滴灌条件下水分运动规律的研究 [J]. 水利学报, 1990(1): 11-12.
- [4] 费良军, 吴军虎, 王文焰, 等. 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, 2001, 8(5): 137-140.