

滴灌条件下侧柏林地根区土壤水分运动规律研究

王治军, 雒天峰
(甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在山地造林试验区, 选择了 5 种滴头流量, 研究了侧柏林地根区土壤滴灌条件下地表积水区半径、湿润锋水平扩散半径、湿润锋垂直入渗深度、湿润体大小等表征滴灌水分入渗的特征值。分析试验数据表明: 地表积水区半径、湿润锋水平扩散半径与灌水延续时间的关系可用对数函数描述; 湿润锋垂直入渗深度与灌水延续时间之间的关系可用幂函数描述, 树木根系是影响湿润锋垂直入渗的因素之一。在灌水过程中, 湿润锋水平扩散速度总大于垂直入渗速度, 湿润体为平卧的椭球体。

关键词: 滴灌; 水分运移; 山地造林
中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)04-0013-04

单个滴头下土壤水分入渗湿润体的大小、地表积水区半径、湿润锋的水平扩散距离和垂直入渗深度等 4 个表征滴灌水分入渗的特征值是滴灌系统设计中确定滴头流量、滴头间距、灌溉制度等的重要基础和依据。国内外学者对 4 个特征值都已进行了广泛研究。刘晓英等^[1]采用 ADI 和 Newton-Raphson 法联合求解数学模型, 不同流量的室内滴灌试验表明: 滴头流量越大, 滴头附近形成的饱和区和湿润锋水平方向的运移距离也越大, 湿润锋水平方向和垂直方向的最大运移与入渗时间平方根存在着线性关系, 任意时刻湿润锋形状可用半椭圆形方程表示。吕谋超等^[2]对用发丝式微管滴头的地下滴灌湿润锋进行了试验观测, 结果拟合表明多项式模型相关系数最大。朱德兰等^[3]将滴灌水分入渗分为三个阶段: 第一阶段为等速移动阶段, 水分呈现圆形扩散, 即水平扩散、垂直扩散速度基本相同; 第二阶段, 不等速阶段, 水分垂直扩散速度大于水平扩散速度; 第三阶段, 垂直扩散阶段, 水平扩散速度近似等于零。同时提出滴头流量越大, 下渗越快, 湿润锋扩散半径随灌水时间的变化以指数模型最佳 ($L = at^b$)。汪志荣等^[4]提出积水范围与灌水时间可以用幂函数描述, 粗砂土的湿润体形状近似为半球体。李明思等^[6]得出滴头流量对湿润锋水平运移的影响比对垂直运移的影响大, 地表积水区的变化对土壤湿润锋水平运移有控制作用。刘雪芹等^[10]研究得出均质沙壤土在滴灌条件下, 水平方向和垂直方向的湿润锋运移速率均表现为初期较快, 随着湿润体的不断增大而减小, 其过程可用幂函数表示。虽

然国内外学者对滴灌条件下不同土质的入渗规律已有充分研究, 但对滴灌在黄土区山地造林中的应用研究较少。所以研究山地造林中滴灌条件下入渗规律对完善节水灌溉理论、设计山地造林中滴头流量、滴头间距及制定灌溉制度等具有重要的科学研究意义和应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

为了不扰动试验区土壤的原有物理结构、不破坏树木根系的分布特点, 并使试验结果具有代表性, 试验点选择在滴灌系统运行 1 年的兰州市西固区青石台滴灌试验区内。山坡坡度 45°, 滴灌毛管与等高线平行布置。树木选择 2002 年春季定植、长势良好、无虫害、无伤损的侧柏, 其平均株高 1.4 m, 地径 0.036 m, 平均根系深度 0.34 m。利用烘干法测得树木根部土壤含水率变化不大, 含水率平均为 8.82%, 偏差±1.6%; 平均容重为 1.46 g/cm³, 偏差±1.3%。

1.2 研究方法

通过调节所选择树木所在分支管上的压力调节阀以获得流量分别为 $Q_1=2.0\text{ L/h}$ 、 $Q_2=2.5\text{ L/h}$ 、 $Q_3=3.0\text{ L/h}$ 、 $Q_4=4.0\text{ L/h}$ 、 $Q_5=4.5\text{ L/h}$ 。为了使树木枝条不影响滴头流态, 滴头安装在距树木 0.05 m 处, 清除树木周围的杂草, 使观测平面平整、干净。以滴头为中心, 将观测平面四等分, 取其中一等分, 距东西分割线、南北分割线各 0.05 m 开挖宽 0.8 m、深 0.5 m 的观测坑, 在观测坑的两面紧贴土

收稿日期: 2007-07-11
基金项目: 科技部西北开发专项(2005BA901A15)
作者简介: 王治军(1963—), 男, 河南新郑人, 本科, 高级工程师, 主要从事节水灌溉新技术及雨水利用方向的研究。

层安装有机玻璃板,以观测湿润锋扩散情况及防止地表积水进入观测坑,观测坑如图 1 所示。开始灌水后每 10 min 观测地表积水区半径、湿润锋水平扩散半径、湿润锋垂直入渗深度,以便分析湿润锋扩散随时间的变化规律。

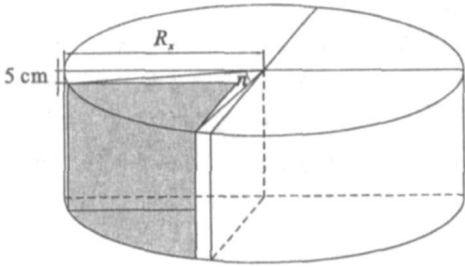


图 1 试验观测坑示意图

Fig.1 Experimental observation pit

2 结果与分析

2.1 地表积水区半径随灌水时间的变化规律

灌水过程中发现,5 种流量下的滴头周围都出

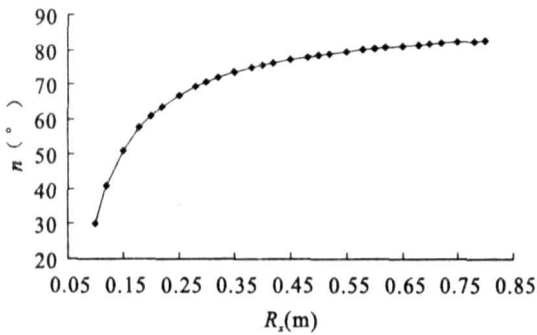


图 2 n 与 R_x 关系示意图

Fig.2 The relationship of n and R_x

由图中可以看出,滴灌条件下地表积水区半径 (R'_x)与灌水时间的对数拟合式相关性较好,相关系数在 $R^2=0.98$ 左右。经过试验数据分析及现场观测,发现灌水初期地表积水区半径变化较快,在地表形成一个薄层积水区,随着灌水时间的延续,地表积水区半径变化逐步缓慢。灌水延续到 150 min 左右,集水区半径基本不变,三维点源入渗实际上已经成为一个具有薄层积水并且点源积水面积逐渐扩大的变边界点源(广义点源)三维空间入渗问题^[4]。灌水结束后,地表积水区在 5~8 min 后迅速消失。

2.2 湿润锋水平扩散半径随灌水时间的变化规律

在基质势的作用下,湿润锋随水平方向扩散。灌水开始后,每 10 min 量测湿润锋水平扩散半径

现积水区,由于试验树木根部开挖观测坑,所以滴灌地表积水范围为非规则体(扇形),试验中每 10 min 测量一次积水区南北宽度 l_1 、东西宽度 l_2 ,数据分析时取 $R_x = (l_1 + l_2)/2$ 计算原面积,然后求出没有观测坑的积水区半径。设试验树木积水区半径为 R_x ,则积水区面积可用公式(1) 计算得到。由于点源滴灌积水区都是以滴头为圆心,半径为 R'_x 的圆,所以按照面积 S 反求出积水区半径 R'_x ,分析获得积水区半径 R'_x 与灌水时间 t 的关系。

$$S = \pi R_x^2 \left[1 - \frac{n}{360} \right] + \frac{0.05 R_x^2 + 0.001125}{\sqrt{R_x^2 - 0.0025}} - 0.0025 \quad (1)$$

其中, n 是开挖区域圆弧所对应的圆心角,其值是随积水区半径 R_x 变化而变化,经过实际计算绘得拟合曲线图 2。从图 2 中就可查获不同的 R_x 所对应的 n 值。

将计算获得的 R'_x 用对数公式 $R'_x = a \ln t + b$ 拟合。图 3 为不同滴头流量不同时刻的地表积水半径与灌水时间的对数拟合曲线图。

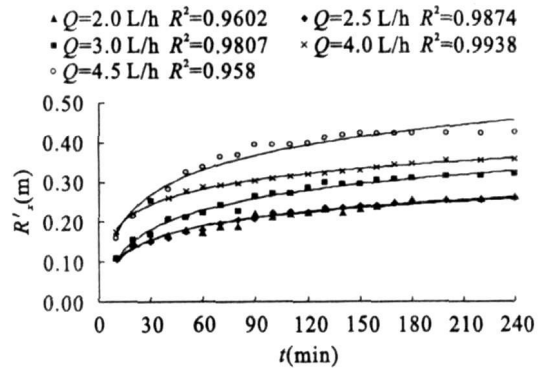


图 3 R'_x 随时间 t 变化曲线

Fig.3 The relationship of R'_x and t

R''_x 。湿润锋水平扩散半径计算方法与积水区半径计算方法类似。将实测资料用对数公式 $R''_x = m \ln t + n$ 拟合。图 4 为不同滴头流量下的湿润锋水平扩散半径与灌水时间对数拟合曲线图。为了研究积水区对湿润锋水平扩散的影响,取湿润锋水平扩散半径与积水区半径之差 $\Delta R = R''_x - R'_x$,同样采用对数公式对其拟合,图 5 为半径之差 ΔR 与灌水延续时间的关系图。

分析图 4 发现,对数公式可以很好地描述湿润锋水平扩散半径与时间的关系,其拟合曲线相关性均在 $R^2=0.99$ 以上。同一时间下,湿润锋水平扩散半径随流量的增大而增大。

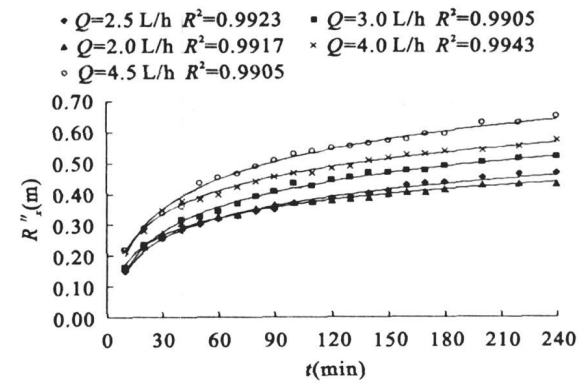


图 4 R_x 随时间 t 的变化曲线
Fig. 4 The relationship of R_x and t

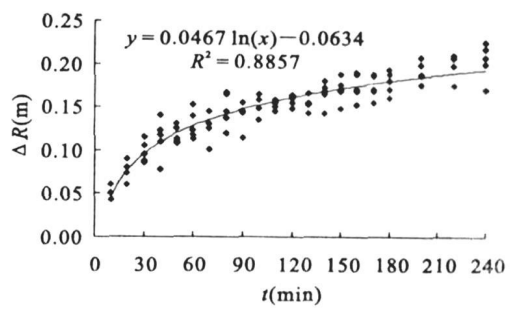


图 5 ΔR 随时间 t 的变化曲线
Fig. 5 The relationship of ΔR and t

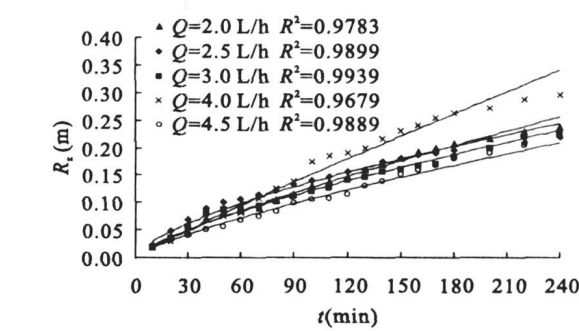


图 6 R_z 随时间 t 的变化曲线
Fig. 6 The relationship of R_z and t

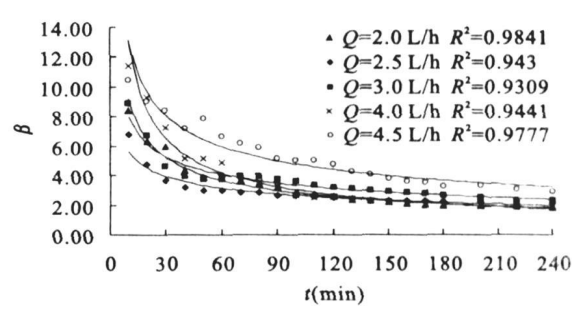


图 7 β 随时间 t 的变化曲线
Fig. 7 The relationship of β and t

从图 5 中可以看到,地表积水区半径与湿润锋水平扩散半径之差变化规律也遵循对数关系式。对比图 3、图 4、图 5 发现,随着积水区面积的增大,湿润锋水平扩散面积逐步增大,当灌水时间延续到 150 min 时,积水区半径变化趋势减缓,此时湿润锋水平扩散区域变化趋势也减缓。表明,地表积水区对湿润锋水平扩散具有控制作用。

2.3 湿润锋垂直入渗深度随灌水时间的变化规律

灌水开始后,每 10 min 量测湿润锋垂直入渗深度 R_z ,将实测资料用乘幂公式 $R_z = at^b$ 拟合。图 6 为不同流量滴头的湿润锋水平扩散半径与灌水时间的拟合曲线图。

从图 6 中可以看出,黄土区滴灌条件下湿润锋垂直扩散深度 R_z 与灌水延续时间 t 可用幂函数表示,其相关性较好,相关系数在 $R^2=0.97$ 左右。从图中看出,流量对湿润锋垂直入渗深度没有明显的影响,这与一些学者研究的流量越大,湿润锋垂直入渗速率越大的结论有一定的差异^[5~10],原因是试验选择野外原型观测,土壤难于达到标准的均质、无杂质土壤,另外树木根系可能对滴灌湿润锋扩散有一定的影响。对于树木根系对滴灌湿润锋垂直入渗的影响还需进一步研究。

2.4 土壤湿润体随灌水时间的变化规律

根据以上研究得出的湿润锋水平扩散半径和垂直入渗深度随灌水时间的关系,计算湿润比,探讨湿润体随时间的变化规律。图 7 是滴灌水分入渗湿润比 β 和灌水时间 t 的拟合曲线,二者符合幂函数关系 $\beta = At^B$,拟合曲线相关系数在 $R^2=0.93$ 以上。由图 7 可知,较小滴头流量在入渗过程中湿润比小于较大流量。无论是大流量滴头还是小流量滴头,灌水初期湿润比较大且湿润比变化较快,表明在这一阶段,湿润锋水平扩散速率大于垂直入渗速率。但在这一时间段内湿润比随着时间的增大都逐渐减小,这表明随着灌水历时的增加,湿润体垂直入渗速率的变化率逐渐大于水平扩散速率的变化率。根据研究得出的地表积水区对湿润锋水平扩散具有控制作用,形成这种现象的原因之一是由于灌水初期地表积水区面积增加较快,随灌水时间的延续,积水区面积变化较小,限制了湿润锋水平扩散速率;二是在此时间段内湿润锋处的基质势梯度远远高于重力势梯度。当入渗时间超过 60 min 以后,在重力势的作用相对增大的情况下,垂直入渗速率的变化率大于水平扩散速率的变化率,湿润比变化趋于减缓,但在观测的 240 min 之内湿润比都在 1.82 以上,即水平

扩散速率总是大于垂直入渗速率。结合现场观测，在灌水过程中，由于湿润锋水平扩散速率大于垂直入渗速率，湿润锋为宽浅形，形似以水平方向为长轴、垂直方向为短轴的平卧半椭球体。灌水结束后，经过延续观测发现，表面积水区迅速消失，湿润锋水平扩散半径和垂直入渗深度仍然增大。在停止灌水延续观测 120 min 后发现，灌水结束 30 min 后水平扩散结束，而垂直扩散在 50 min 后结束。水平扩散半径平均增加 0.056 m，垂直入渗深度平均增加 0.086 m。

3 结 论

- 1) 所选择 5 种流量滴灌，在地表出现积水区，积水区半径与灌水延续时间可以用对数公式表示，拟合曲线相关系数在 $R^2=0.98$ 左右，相同土质、相同灌水时间下流量越大，积水区半径越大。
- 2) 滴灌条件下湿润锋水平扩散半径遵循对数分布，其拟合曲线相关系数均在 $R^2=0.99$ 以上。相同土质、相同灌水时间下流量越大，湿润锋水平扩散半径越大。
- 3) 湿润锋垂直入渗深度与灌水延续时间可用幂函数表示，拟合曲线相关系数在 $R^2=0.97$ 左右。流量对湿润锋垂直入渗深度没有明显的影响。

4) 湿润体受湿润锋水平扩散速率和垂直入渗速率的共同作用，灌水过程中湿润体为宽浅形，类似以水平方向为长轴、垂直方向为短轴的平卧半椭球体。

参 考 文 献:

[1] 刘晓英,杨振刚,王天俊.滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J].水利学报,1990,1,11-21.

[2] 吕谋超,仵 峰,彭贵芳,等.地下和地表滴灌土壤水分运动的室内试验研究[J].灌溉排水学报,1996,15(1):42-44.

[3] 朱德兰,李昭军,王 健,等.滴灌条件下土壤水分分布特性研究[J].水土保持研究,2000,7(1):81-84.

[4] 汪志荣,王文焰,王全九,等.点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].水利学报,2000,6:39-44.

[5] 罗锡文,李就好,俞 龙.滴灌条件下砖红壤水分入渗特性试验研究[J].华南农业大学学报,2000,21(4):74-77.

[6] 李明思,贾宏伟.棉花膜下滴灌湿润锋的实验研究[J].石河子大学学报,2001,5(4):316-319.

[7] 张振华,蔡焕杰,郭永昌,等.滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究[J].农业工程学报,2002,18(2):17-20.

[8] 韦艳葵,贾黎明,邢长山.滴灌在林业上应用的研究与进展[J].世界林业研究,2003,16(4):38-42.

[9] 胡笑涛,康绍忠,马孝义,等.地下滴灌条件下砂质土壤入渗特性试验研究[J].灌溉排水学报,2004,23(5):75-77.

[10] 刘雪芹,范兴科,马 甜.滴灌条件下砂壤土水分运动规律研究[J].灌溉排水学报,2006,25(3):56-59.

Soil water movement under drip irrigation of proscenia in Loess

WANG Zhi-jun, LUO Tian-feng

(Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Drip irrigation used to mountain afforestation has been rarely studied before. Water movement under five dropping speeds in the loess was investigated in the field experiment by measuring vertical and horizontal movement of water in soil and surface water movement. The results showed that the log law can express surface and horizontal movement of water, power function can express vertical movement of water, and tree root is an important factor to impact vertical movement of water. The wetting front simulated an ellipsoid in irrigation process, but it is changed hemisphere after irrigation.

Key words: drip irrigation; water movement; mountain afforestation