

# 温度对点源入渗影响的实验研究

冯宝平<sup>1</sup>, 陈守伦<sup>1</sup>, 汪志荣<sup>2</sup>, 张建丰<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 模拟膜下滴灌技术, 进行了不同温度下的点源入渗实验, 分析温度对土壤湿润体形状、水平湿润半径、垂直湿润深度以及湿润体含水量的影响。结果表明: 湿润体近似为半椭球体, 随着入渗时间的延长, 湿润体不断增大, 温度越高, 湿润半径和深度越大, 而土体平均含水量越小。

**关键词** 温度; 点源入渗; 水平湿润半径; 垂直湿润深度; 湿润体含水量

中图分类号: TV139.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2002)06-0108-04

近年来, 结合地膜覆盖种植技术提出了膜下滴灌。大量研究表明, 覆膜条件可以防止土壤水分散失, 调节土壤温度, 改善土壤水、气、热等物理条件, 创造有利于作物生长的环境<sup>[1~3]</sup>。本文采用点源入渗实验模拟滴灌技术, 分析温度对点源入渗土壤水分运动的影响。

## 1 材料与方法

实验土箱采用 1 cm 厚的有机玻璃板制成, 长宽高为 40 cm × 30 cm × 30 cm。为便于观测湿润体的发展过程, 入渗点源置于土箱一角的正上方, 见图 1。供试土样为西安粉土, 粉碎后过 2 mm 土筛。初始重量含水量为 2.50%, 按干容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup> 分层装入土箱。供水设备为截面积为 50 cm<sup>2</sup> 的马里奥特瓶。点源入渗的滴头流量为 1 L/h (即 16.667 mL/min), 相当于 1/4 土体的流量为 4.167 mL/min。根据温度对土壤水分运动影响的灵敏度分析<sup>[4]</sup>, 采用 5℃, 17℃, 29℃ 和 40℃ 为实验温度。各温度下, 观测湿润体随入渗时间的变化过程。观测时间先密后疏, 为 5 min, 10 min, 30 min 不等。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿润体描述

对于均质土壤, 点源入渗规律以点源中心线为轴对称, 因此以点源中心线为轴, 取 1/4 的土样进行入渗实验, 可以方便观测湿润体变化情况。由于滴头流量即供水量大于土壤入渗能力, 因而在入渗初期, 水平湿润半径远远大于垂直湿润深度。但由于水平方向的水分运动只受基质势的影响, 而垂直方向除了受基质势的作用外, 还受重力势的作用, 所以水分垂直向下的入渗速率大于水平方向的入渗速率, 因此随着时间的延长, 水平湿润半径和垂直湿润深度的差值越来越小。但在较长时间内, 西安土点源入渗的湿润体形状仍为扁椭球体, 即水平湿润半径大于垂直湿润深度, 并且随入渗时间的延长, 湿润体不断增大。

图 2 为 40℃ 点源入渗湿润体发展情况。由图 2 可见: 在入渗时间为 5 min 时, 垂直湿润深度远小于水平湿

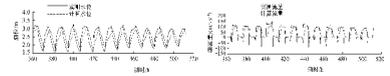


图 1 点源入渗实验装置示意图  
Fig. 1 Device of point-infiltration experiment



图 2 40℃ 点源入渗湿润体形状  
Fig. 2 Wetted soil shape at 40℃

润半径 相差 3.45 cm 随时间延长 ,入渗时间为 300 min 时 ,垂直湿润深度仍小于水平湿润半径 ,但其差值只有 0.95 cm.

此外 ,由于界面影响 ,水平湿润半径最大的地方不是出现在土壤表面 ,而是出现在土壤表面以下 1 cm 左右 .但是最大水平湿润半径和土壤表面湿润半径的差值很小 ,可将湿润体近似看作土壤表面湿润半径为最大水平湿润半径的半椭球体 .点源入渗湿润体形状可用椭圆函数表示 :

$$\frac{X^2}{F_x^2} + \frac{Z^2}{F_z^2} = 1 \tag{1}$$

式中 : $F_x, F_z$ ——任一时刻点源中心处水平湿润半径和垂直湿润深度 ; $X, Z$ ——以点源中心为原点 ,相应时刻湿润体的横坐标和纵坐标 .由图 3 可见 ,椭圆函数模型可以很好地描述点源入渗湿润体形状.

### 2.2 温度对水平湿润半径的影响

图 4 (a)为各温度下点源入渗水平湿润半径与时间关系曲线 .随入渗时间的延长 ,水平湿润半径逐渐增大 ;在相同时间内温度越高 ,水平湿润半径越大.

对水平湿润半径  $F_x$  和时间  $t$  的关系用幂函数  $F_x = at^b$  拟合 ,结果见表 1. 由表可见 :点源入渗水平湿润半径与时间为显著的幂函数关系 ,随温度升高 ,参数  $a$  逐渐增大 ,参数  $b$  逐渐减小 .由于水平湿润半径随温度升高而增大 ,与参数  $a$  的变化趋势一致 ,所以  $a$  对水平湿润半径的影响权重大于  $b$  的影响权重 ,而且  $b$  在 0.3 左右变化 ,故将幂指数取为 0.3 按线性关系  $F_x = kt^{0.3}$  拟合  $F_x$  与  $t^{0.3}$  ,结果见图 4 (b).  $F_x$  与  $t^{0.3}$  的斜率  $k$  随温度升高逐渐增大 ,见表 1.

图 3 40℃湿润体形状实测值与计算值比较  
Fig.3 Observed and calculated values of wetted soil shape at 40℃

图 4 水平湿润半径与时间关系

Fig.4 Relationship between  $F_x$  and  $t$

表 1 水平湿润半径与时间参数表

Table 1 Relationship between horizontal wetted radiu and time

温度 $T/^\circ\text{C}$	$F_x = at^b$			$F_x = kt^{0.3}$	
	$a$	$b$	$R^2$	$k$	$R^2$
5	2.0637	0.3609	0.9970	2.7657	0.9911
17	3.0599	0.2988	0.9874	3.0380	0.9968
40	4.3448	0.2582	0.9993	3.5407	0.9952

由于温度与土壤水分运动的关系为幂函数关系<sup>[5]</sup> ,所以按幂函数关系拟合参数  $k$  与温度  $T$  结果为

$$k = 2.632T^{0.1159} \quad (R^2 = 0.9715) \tag{2}$$

将式(2)代入  $F_x = kt^{0.3}$  ,得

$$F_x = 2.632T^{0.1159}t^{0.3} \tag{3}$$

用 29℃的实测资料验证式(3) 结果见图 5 ,可以看出计算值和实测值吻合很好.

### 2.3 温度对垂直湿润深度的影响

由图6可见:垂直湿润深度与时间为幂函数关系,垂直湿润深度与时间的0.4次方为线性函数关系;随入渗时间的延长,垂直湿润深度逐渐增大;在相同时间内温度越高,垂直湿润深度越大, $F_z$ 与 $t^{0.4}$ 直线的斜率越大。

分别按  $F_z = At^B$  和  $F_z = Ct^{0.4}$ 对垂直湿润深和时间进行拟合,结果见表2。

图5 29℃点源入渗水平湿润半径与时间曲线

Fig.5 Relationship between  $F_x$  and  $t$  at 29℃

图6 垂直湿润深度  $F_z$  与时间  $t$  曲线

Fig.6 Relationship between  $F_z$  and  $t$

表2 垂直湿润深度  $F_z$  与时间  $t$  关系参数

Table 2 Parameters of relationship between vertical wetted depth and time

温度 $T/℃$	$F_z = At^B$			$F_z = Ct^{0.4}$	
	$A$	$B$	$R^2$	$C$	$R^2$
5	1.0438	0.4733	0.9985	1.4928	0.9945
17	1.5108	0.4130	0.9996	1.6133	0.9993
40	1.5371	0.4380	0.9997	1.8562	0.9984

按幂函数关系拟合参数  $C$  与温度  $T$  的关系,结果为

$$C = 1.2496T^{0.1019} \quad (R^2 = 0.9647) \tag{4}$$

将式(4)代入  $F_z = Ct^{0.4}$ ,得

$$F_z = 1.2496 T^{0.1019} t^{0.4} \tag{5}$$

用29℃的实测资料验证式(5),结果见图7,可见计算值和实测值非常接近。

### 2.4 温度对湿润体平均含水量的影响

假定湿润体为半椭球体,根据观测到的水平湿润半径和垂直湿润深度,可计算出点源入渗湿润土体的体积,即

$$V = \frac{2}{3}\pi F_x F_z = 18.130T^{0.3337}t \tag{6}$$

式中: $V$ ——湿润土体的体积,  $cm^3$ 。

1/4半椭球体的滴头流量为4.167 mL/min,换算为整个半椭球体的滴头流量时,入渗的水量

$$W = 16.667t$$

图7 29℃点源入渗垂直湿润深度与时间曲线

(7) Fig.7 Relationship between  $F_z$  and  $t$  at 29℃

式中:  $t$ ——入渗时间, min;  $W$ ——总供水量, mL.

点源入渗湿润土体体积含水量与入渗前相比, 平均增量为渗入土体的水量与湿润土体的体积之比, 即  $\Delta\bar{\theta} = W/V$ . 则湿润体的平均含水量增量为

$$\Delta\bar{\theta} = W/V = 0.9193T^{-0.3337} \quad (8)$$

点源入渗湿润土体平均体积含水量为

$$\theta_a = \Delta\bar{\theta} + \theta_0 = 0.9193T^{-0.3337} + \theta_0 \quad (9)$$

式中  $\theta_0$  为土壤的初始体积含水量. 由式(9)可以看出: 点源入渗湿润土体的平均含水量与入渗时间无关, 而与入渗温度密切相关, 温度越高, 土体平均含水量越小.

### 3 结 论

a. 点源入渗的湿润体近似为半椭球体, 并且随着入渗时间延长湿润体不断增大. 在较长时间内, 西安土点源入渗的湿润体形状仍为扁椭球体.

b. 随入渗时间延长, 水平湿润半径和垂直湿润深度逐渐增大, 在相同时间内, 温度越高,  $F_x, F_z$  越大.

c. 点源入渗湿润土体的平均含水量与入渗时间的关系不大, 但与入渗温度密切相关, 温度越高, 土体平均含水量越小.

d. 本文通过对人工装填扰动土的室内点源入渗实验, 分析温度对点源入渗土壤水分运动的影响, 在一定程度上模拟了田间实际滴灌土壤水分运动. 此项研究对于制定合理的灌溉制度有一定的参考价值.

#### 参考文献:

- [1] 刘毓中. 对地膜覆盖棉田增温、保墒、提墒和地面水入渗补给作用机理的探讨[J]. 灌溉排水, 1989, 8(3): 10~17.
- [2] 杨邦杰, 隋红建. 土壤水热运动模型及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 1~10.
- [3] 中国地膜覆盖栽培研究会. 地膜覆盖栽培技术大全[M]. 北京: 农业出版社, 1988. 5~20.
- [4] 冯宝平, 张建丰, 汪志荣. 关于土壤水分运动温度灵敏度的初探[A]. 农业高効用水与水土环境保护[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000. 484~487.
- [5] 冯宝平, 张建丰, 汪志荣. 温度对土壤水分运动影响的研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 46~49.

## Effect of temperature on point-infiltration

FENG Bao-ping<sup>1</sup>, CHEN Shou-lun<sup>1</sup>, WANG Zhi-rong<sup>2</sup>, ZHANG Jian-feng<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. College of Water Resources and Hydropower, Xi'an Univ. of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** By simulation of the drip irrigation technology in mulched cultivation, point-infiltration experiments are performed under different temperatures, and the influences are analyzed of the temperature on the shape of wetted soil, horizontal wetted radius, vertical wetted depth, and water content of wetted soil. The results show that the shape of wetted region is approximately to be a semi-ellipse, and the region expands with the increasing time of infiltration, and that the higher the temperature, the larger the wetted radius and the wetted depth, while the lower the averaged water content in soil.

**Key words:** temperature; point-infiltration; horizontal wetted radius; vertical wetted depth; water content of wetted region