

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0047



## 水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响

刘利华, 费良军\*, 朱红艳

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)



刘利华

**摘要:**为了解水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响,通过室内滴灌入渗模拟试验,研究了滴灌条件下西安粉壤土在不同水温(4, 20, 30, 40 °C)时的水分入渗特性。结果表明:水平和垂直湿润锋运移距离均随着入渗时间的延长而增大,相同入渗历时,入渗水温越高,滴头流量越大,入渗的水量越多,湿润锋运移距离越大;分别建立了滴灌条件下不同温度水分入渗时水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间和水温的关系模型,其相关系数均大于0.97。湿润体的平均含水量与入渗水温和时间密切相关,入渗水温越高,土体平均含水量越小;含水率等值线随着到滴头距离由近到远而从疏到密分布,离滴头越近,土壤含水率越高;随着入渗水温的不断升高,入渗到同一深度所需时间逐渐减小,对土层温度的影响越大,在入渗400 min内以土面至土面以下15 cm深度范围内的土温变化更为突出。结论可为发展滴灌技术提供参考依据。

**关键词:**水温;滴灌;入渗特性;土层温度;湿润锋运移距离

中图分类号: S275.6 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2019)02-0166-08

刘利华, 费良军, 朱红艳. 水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(2): 166-173.

LIU Lihua, FEI Liangjun, ZHU Hongyan. Effects of water temperature on soil water infiltration characteristics under drip irrigation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2019,37(2):166-173. (in Chinese)

## Effects of water temperature on soil water infiltration characteristics under drip irrigation

LIU Lihua, FEI Liangjun\*, ZHU Hongyan

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** In order to determine the effect of different water temperature on soil water infiltration characteristics of drip irrigation, the research about Xi'an silty loam water infiltration was carried out by drip irrigation experiment at the water temperature of 4, 20, 30 and 40 °C. The results show that: The migration distance of the wetting front increases with the infiltration time. At the same infiltration time, with the water temperature rising, the migration distance of the wetting front and dripper discharge will increase. The model of horizontal (vertical) migration distance of the wetting front, the infiltration time and water temperature are established under the condition of drip irrigation water infiltration at different water temperatures, its correlation coefficient is greater than 0.97. The average moisture content of the wetted body is closely related to the infiltration water temperature and time. The higher the infiltration water temperature, the smaller the average water content of the soil. The isoline map of soil moisture content in the wetted body are closer to the drip distance from near to far and from the sparse to the

收稿日期: 2017-03-09; 修回日期: 2017-05-15; 网络出版时间: 2019-01-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190102.1028.026.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479161, 51279157); 新疆水利科技项目(104-435016059); 中国博士后基金资助项目(2015M582763XB)

第一作者简介: 刘利华(1992—), 男, 甘肃崇信人, 博士研究生(1131400502@qq.com), 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通信作者简介: 费良军(1963—), 男, 陕西蓝田人, 教授, 博士生导师(feiliangjun2008@163.com), 主要从事节水灌溉和农业水资源利用研究。

dense distribution. With the infiltration of water temperature continues to rise, infiltration into the same depth of time gradually reduces and has a greater impact on soil temperature. The change of soil layer temperature in the depth range of 15 cm below soil surface is more prominent within 400 minutes of infiltration time. The conclusion provides the reference for further studies of drip irrigation technology.

**Key words:** water temperature; drip irrigation; infiltration characteristics; soil layer temperature; migration distance of the wetting front

在中国北方大部分地区,土壤在冬春季节会经历周期性的冻结与消融过程,农田的冬灌和春灌是在冻融条件下进行的,春季融雪时的灌溉水温为冰水混合物的温度,温度接近0℃,而在夏季,有的滴灌带内灌溉水温最高可达40℃<sup>[1]</sup>.同时,随着近年来农业覆膜技术广泛的推广与应用,由覆膜引起土壤温度的变化对土壤水分入渗的影响,在农业节水灌溉研究中越来越受到关注<sup>[2-3]</sup>.因此,深入研究水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响对节水灌溉具有十分重要的科学价值和实际生产意义。

温度影响着土壤水分的黏滞系数、微生物活动、水汽扩散等过程<sup>[2]</sup>.多年来国内外学者就温度对土壤水分运动的影响及点源入渗湿润体特性方面已做了大量的研究<sup>[4-6]</sup>.刘显等<sup>[7]</sup>、张智韬等<sup>[8]</sup>研究了涌泉根灌土壤湿润体特性的变化规律.高艳娟等<sup>[9]</sup>研究认为地温是影响潜水井水温的主要因素.CHENG等<sup>[10]</sup>研究认为土壤水分对土壤温度变化有着重要影响,并且得出对温度变化在结冰期比融冰期更显著的结论.任杰等<sup>[11]</sup>通过自制土槽试验,分析研究了低温水入渗条件下水头对入渗参数、水分场与温度场的影响规律.高红贝等<sup>[12]</sup>研究表明,温度变化主要是通过影响土壤水分的性质及土壤结构对土壤水分运动过程产生影响,非等温条件下的土壤温度的分布和变化主要是通过对水的理化性质的影响,进而影响到基质势、溶质势以及土壤水动力学参数.李明思等<sup>[13]</sup>、王旭等<sup>[14]</sup>研究认为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.

以上这些研究在分析土壤水分入渗与温度的关系方面取得了一定进展,但关于滴灌条件下水温对土壤水分入渗特性影响的研究目前还较少.因此,文中通过室内土箱滴灌入渗模拟试验,研究滴灌条件下西安粉壤土在不同水温时的水分入渗过程,重点分析水温对入渗过程的影响及湿润体水分温度动态变化,以期为更好地发展滴灌技术提供一定科学参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验土壤取自西安市洪庆镇农田,取样时间为2016年9月,取样区地形平缓,地势北高南低,以农业用地为主,土壤类型以壤土为主,有机质丰富,通透性良好.取样时除去样点处表层杂物后挖取深度为0—30 cm的土壤;取样后将同种供试土壤不同取样点样品充分混合并带回实验室自然风干、研磨后过2 mm土筛,用烘干法测定土壤初始含水率.利用Mastersizer—2000型激光粒度分析仪测定供试土壤的机械组成,粒径为0 mm< $d$ ≤0.002 mm,0.002 mm< $d$ ≤0.020 mm,0.020 mm< $d$ ≤0.200 mm的颗粒分别占9.78%,56.59%,33.63%(体积分数),根据国际制土壤质地分类标准,供试土壤为粉壤土.

### 1.2 研究方法

试验于2016年10—12月在西安理工大学水资源研究所恒温恒湿实验室内进行.采用定水头滴灌入渗模拟试验研究西安粉壤土在不同水温时的水分入渗规律.试验选用入渗水温为4,20,30和40℃.试验前根据土壤初始含水率和土壤容重(1.35 g/cm<sup>3</sup>),分层(5 cm)装入10 mm厚的有机玻璃制成的长×宽×高为30 cm×30 cm×45 cm的土箱中,层间打毛,装土高度为40 cm.土箱侧面开设孔径为1 cm的圆孔,孔间距为3 cm.采用注射器7号针头模拟滴头,通过马氏瓶连接橡胶软管向滴头供水.试验装置如图1所示.

试验时将预先配置为所需温度的水注入马氏瓶,为保证试验过程中水温恒定,较高(>30℃)和较低(<15℃)水温试验时将连接滴头的橡胶管加长后分别通过DK-98-IIA型电热恒温水浴锅和TCD-120A型卧式冷藏柜,整个试验过程中温度变幅控制在±0.3℃范围内.试验前将所有试验装置放入实验室一定时间(≥12 h),以保证与室温一致.试验过程中按照先密后疏的原则观测土壤湿润体的

变化过程,记录入渗时间和湿润锋运移距离,在装土过程中通过土箱侧面开设的圆孔按照预定位置埋设 Watchdog 水分传感器和 L93-8 型温度记录仪,实时采集数据.所有试验均有重复.

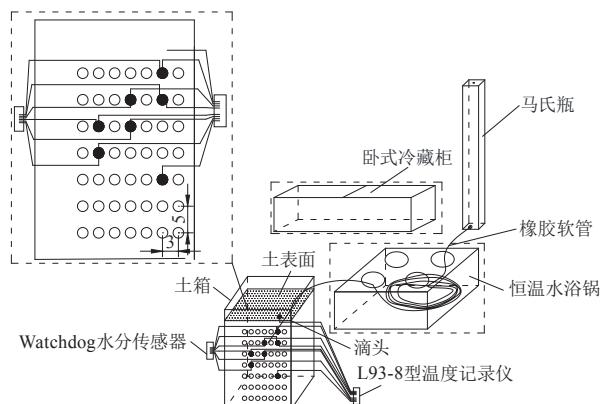


图 1 试验装置构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

## 2 结果与分析

### 2.1 湿润体特性分析

#### 2.1.1 湿润体形状分析

图 2 为入渗水温为 30 °C 时的西安粉壤土滴灌入渗时的湿润锋剖面观测结果.可以看出:不同滴灌水温条件下,西安粉壤土滴灌入渗所得出的湿润体形状近似为半椭球体.在入渗前期,由于滴头附近产生的积水加速了湿润锋水平运移速率,致使湿润锋水平运移距离  $F_x$  大于垂直运移距离  $F_z$ .随着入渗时间的延长,土壤湿润体不断扩大,湿润锋垂直和水平运移距离的差值逐渐减小.由于在水平方向运移的水分主要受到土壤基质吸力的作用,而在垂直方向运动的水分不仅受到土壤基质吸力和温度势的作用,还受到重力势的作用,因此垂直方向的湿润锋推进速度比水平方向的湿润锋推进速度快,在经过一定时间后,湿润锋垂直运移距离将大于水平运移距离.具体表现:入渗 3 min 时,湿润锋垂直运移距离远小于水平运移距离,两者相差 3.1 cm;入渗 180 min 时,湿润锋垂直运移距离与湿润锋水平运移距离的差值仅为 0.9 cm;在入渗 240 min 以后,湿润锋垂直运移距离大于水平运移距离.

此外,水平湿润半径的最大值并不是湿润土体表面的水平湿润锋运移距离,而是在湿润土体表面以下 1—5 cm 范围内,水平湿润锋运移距离较其略小.水平湿润锋运移距离方便观测和分析,也有利于

灌水定额的确定,并且可以为实际灌溉工程中滴头的布设提供依据.因此,为了便于分析计算,将湿润土体表面的水平湿润锋运移距离看作半椭球体的最大湿润半径.水温为 4, 20, 40 °C 的水分入渗试验结果与 30 °C 的水分入渗土壤湿润体的形状相似并且入渗所呈现的规律基本一致.

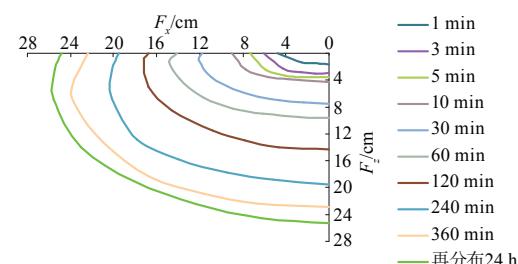
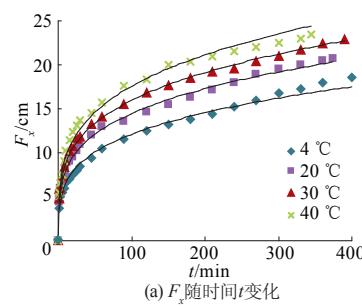


图 2 30 °C 水分入渗时土壤湿润体剖面图

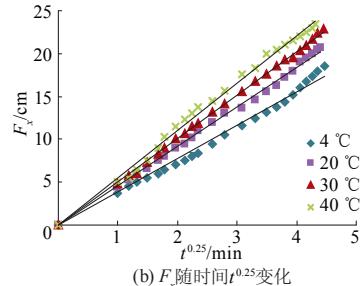
Fig.2 Wetted body profile with 30 °C water infiltration

#### 2.1.2 水平湿润锋变化规律

水平湿润锋运移距离可以为实际灌溉工程中滴头的布设提供依据,因此在滴灌条件下探讨水温对水平湿润锋运移距离的影响.根据实测试验数据,将 4 种不同水温滴灌入渗试验所得出的湿润体水平湿润锋运移距离  $F_x$  随时间  $t$  的变化过程绘于图 3.



(a)  $F_x$  随时间  $t$  变化



(b)  $F_x$  随时间  $t^{0.25}$  变化

图 3 不同水温入渗时湿润锋水平运移距离变化过程

Fig.3 Horizontal distance of wetted front for different water temperatures

由图 3a 可以发现:随着入渗时间的延长,入渗水量增加,湿润锋水平运移距离逐渐增加,但增加的速度逐渐减缓;在相同时间内,水温越高,水平湿润锋运移距离越大.不同温度下,水平湿润锋运移距

离  $F_x$  与时间  $t$  呈极显著的幂函数关系,即

$$F_x = At^B, \quad (1)$$

式中: $F_x$  为水平湿润锋运移距离,cm;  $t$  为人渗时间,min; $A, B$  为拟合参数.

利用式(1)对图3a 中不同入渗水温  $T$  条件下的实测试验数据进行拟合,结果见表1.由表1可以看出:①水平湿润锋运移距离  $F_x$  与入渗时间  $t$  的幂函数关系的决定系数  $R^2$  均大于 0.98,即按照幂函数关系建立的相关关系显著;②随着水温的不断升高,参数  $A$  逐渐增大,参数  $B$  基本不变.由于湿润锋水平运移距离随着入渗水温的升高而逐渐增大,与参数  $A$  的变化规律一致,说明参数  $A$  对湿润锋水平运移距离的影响权重大于  $B$ ,而参数  $B$  在 0.25 左右变化,为便于分析,将幂指数即参数  $B$  取为 0.25,按照线性关系  $F_x = kt^{0.25}$  对不同水温入渗时的实测试验数据进行拟合,拟合关系见图3b 和表1,其系数  $k$  随着水温的升高逐渐增大,决定系数  $R^2$  均大于 0.98,这说明按照时间  $t$  的 4 次方根建立的线性模型相关关系显著.

**表1 湿润锋水平运移距离与时间关系参数表**  
**Tab.1 Parameter table of horizontal migration distance of wetting front and time**

$T/^\circ\text{C}$	$F_x = At^B$			$F_x = kt^{0.25}$	
	$A$	$B$	$R^2$	$k$	$R^2$
4	3.547 6	0.266 3	0.994 4	3.878 9	0.987 9
20	4.435 8	0.256 7	0.998 0	4.590 1	0.996 6
30	4.833 6	0.259 4	0.998 0	5.054 1	0.998 6
40	5.135 5	0.266 9	0.987 6	5.524 9	0.993 5

按照幂函数关系对  $k-T$  进行拟合,结果为

$$k = 3.134 \cdot 3T^{0.1429} (R^2 = 0.9412). \quad (2)$$

将式(2)代入  $F_x = kt^{0.25}$ ,可以建立滴灌条件下不同温度水分入渗时水平湿润锋运移距离  $F_x$  与入渗时间  $t$  和水温  $T$  的关系模型为

$$F_x = 3.134 \cdot 3T^{0.1429} t^{0.25}. \quad (3)$$

### 2.1.3 垂直湿润锋变化规律

图4 为不同水温滴灌入渗试验所得出的湿润体垂直湿润锋运移距离  $F_z$  随入渗时间  $t$  的变化曲线.可以看出:湿润锋垂直运移距离与水平湿润锋运移距离的变化规律基本一致.随着入渗时间的延长,垂直湿润锋运移距离逐渐增大;在相同时间内,水温越高,垂直湿润锋运移距离越大.

同样的,按照幂函数模型拟合  $F_z$  与  $t$  的变化关系,即

$$F_z = at^b, \quad (4)$$

式中: $F_z$  为垂直湿润锋运移距离,cm;  $t$  为人渗时间,

min; $a, b$  为拟合参数.

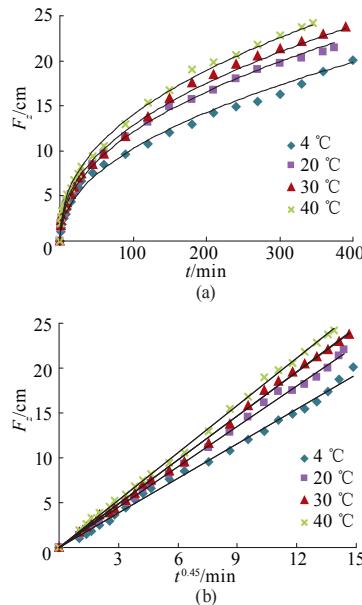


图4 不同水温入渗时湿润锋垂直运移距离变化过程

Fig.4 Vertical distance of wetting front for different water temperatures

利用式(3)对图4a 中不同水温入渗时的实测试验数据进行拟合,结果见表2.由表可以看出:①垂直湿润锋运移距离  $F_z$  与入渗时间  $t$  的幂函数关系的决定系数  $R^2$  均大于 0.99,即按照幂函数关系建立的模型关系显著;②随着水温的不断升高,参数  $a$  逐渐增大,参数  $b$  基本不变.由于湿润锋垂直运移距离随着入渗水温的升高而增大,和参数  $a$  的变化规律一致,说明参数  $a$  对垂直湿润锋运移距离的影响权重大于  $b$ .同时,参数  $b$  稳定在 0.45 左右,故将幂指数即参数  $b$  取为 0.45,按照线性关系  $F_z = Ct^{0.45}$  对不同水温入渗时的实测试验数据进行拟合,拟合关系见图4b 和表2.可以看出,直线斜率即参数  $C$  随着水温的升高逐渐增大,决定系数  $R^2$  均大于 0.99,说明该线性模型相关关系显著.

**表2 湿润锋垂直运移距离与时间关系参数表**  
**Tab.2 Parameter table of vertical migration distance of wetting front and time**

$T/^\circ\text{C}$	$F_z = at^b$			$F_z = Ct^{0.45}$	
	$a$	$b$	$R^2$	$C$	$R^2$
4	1.142 0	0.476 5	0.993 9	1.290 8	0.995 8
20	1.489 7	0.454 5	0.998 9	1.500 3	0.998 2
30	1.644 5	0.446 3	0.997 1	1.629 6	0.998 0
40	1.900 9	0.433 7	0.998 4	1.759 1	0.998 7

按照幂函数关系对  $C-T$  进行拟合,结果为

$$C = 1.071 \cdot 2T^{0.1254}, R^2 = 0.9463. \quad (5)$$

将式(4)代入  $F_z = Ct^{0.45}$ ,可以建立滴灌条件下

不同温度水分入渗垂直湿润锋运移距离  $F_z$  与入渗时间  $t$  和水温  $T$  的关系模型为

$$F_z = 1.071 \cdot 2T^{0.1254}t^{0.45}. \quad (6)$$

## 2.2 水温对入渗能力的影响

### 2.2.1 水温对入渗水量的影响

累积入渗量可以很好地反映土壤的入渗能力,但其针对的是一维入渗过程中单位面积土壤入渗的水量,而滴灌入渗属于空间三维点源入渗,在本次试验过程中,采用马氏瓶供水保证了供水水头和出水量一定,在入渗过程中土表面没有形成积水,仅在入渗后期滴头附近处由于水滴打击形成的小坑内有少量积水,可忽略不计,因此认为在试验中水分全部渗入土中,用入渗水量  $W$  的变化来反映土壤的入渗能力.图 5 为不同水温滴灌入渗 360 min 时的入渗水量变化图.

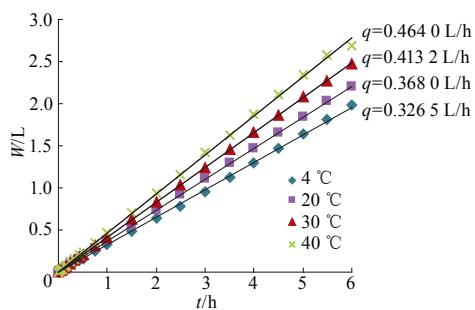


图 5 不同水温条件下入渗水量变化

Fig.5 Infiltration water changes for different water temperatures

由图 5 可以看出:不同水温条件下入渗的水量明显不同.在相同的人渗时间内,水温越高,入渗的水量越大.随着入渗历时不断增加,不同入渗水温所对应的人渗水量差异愈明显,在图 5 中表现为直线越来越陡,即直线的斜率越来越大.而图中直线的斜率表示滴头流量,显然,随着入渗水温的升高,所对应的滴头流量增大.这是因为温度不同,水分的理化性质不同,即使马氏瓶出水口出水量一定,但随着水温的升高,水的表面张力降低,黏滞系数减小,使得橡胶管内水的流速增大,进而导致滴头流量变大,入渗水量增加<sup>[15]</sup>.

### 2.2.2 水温对湿润土体平均体积含水量的影响

不同水温滴灌入渗时所得出的湿润体形状近似为半椭球体,试验过程中所得出的湿润体为 1/4 半椭球体,根据试验观测到的水平和垂直湿润锋运移距离,计算湿润体体积  $V$ ,即

$$V = \frac{1}{6}\pi F_x^2 F_z = 6.7087 T^{0.4112} t^{0.95}, \quad (7)$$

式中: $V$  为湿润体体积,  $\text{cm}^3$ .

入渗水温为 30 °C 时,入渗的水量为

$$W = 0.4132 t, \quad (8)$$

式中: $W$  为水温为 30 °C 时入渗的水量,  $\text{L}$ ;  $t$  为入渗时间,  $\text{h}$ ; 0.4132 表示 30 °C 水滴灌时的滴头流量为 0.4132  $\text{L}/\text{h}$ .

与入渗之前相比,湿润体体积含水量的平均增量为

$$\Delta\bar{\theta} = \frac{W}{V} = 0.0616 T^{-0.4112} t^{0.05}. \quad (9)$$

因此,30 °C 水滴灌后湿润体的平均含水量为

$$\bar{\theta} = \Delta\bar{\theta} + \theta_0 = 0.0616 T^{-0.4112} t^{0.05} + \theta_0, \quad (10)$$

式中: $\theta_0$  为试验土壤初始体积含水量.

按照以上计算方法得到其他 3 种水温对应的湿润体平均含水量:

① 当水温 4 °C 时,

$$\Delta\bar{\theta} = 0.0487 T^{-0.4112} t^{0.05} + \theta_0; \quad (11)$$

② 当水温 20 °C 时,

$$\Delta\bar{\theta} = 0.0549 T^{-0.4112} t^{0.05} + \theta_0; \quad (12)$$

③ 当水温 40 °C 时,

$$\Delta\bar{\theta} = 0.0692 T^{-0.4112} t^{0.05} + \theta_0. \quad (13)$$

由式(10)—(13)可以看出:滴灌条件下不同温度水分入渗所得湿润体的平均含水量与入渗水温和时间密切相关.在水头和出水量一定的情况下,入渗水温越高,滴头流量增大的同时导水率变大,使得湿润范围增大,最终导致湿润体平均含水量越少.

## 2.3 水分温度动态变化

为了研究不同水温滴灌时所得出湿润体内水分和温度的分布以及变化规律,以滴头所在的位置为坐标原点,规定水平向左和垂直向下为正,根据实测试验数据,采用 Surfer11 分别绘制停止供水时不同入渗水温条件下的湿润体土壤含水率等值线图(见图 6)和温度分布等值线图(见图 7).

由图 6,7 可以看出:不同的入渗水温对湿润体内水分和温度的分布均有较大影响.含水率等值线随着到滴头距离的由近到远而从疏到密分布,离滴头越近,土壤含水率越高.入渗水温升高时,土壤的湿润区域增加,对湿润体内温度的影响增大.邵明安等<sup>[16]</sup>研究认为:水的导热率是空气的 20 倍,土壤含水率的大小直接决定着土壤导热率.在湿润体中,水取代了土壤颗粒之间的空气并形成水膜,易于热量的传递,导热率增加.同时,由前面分析可知,入渗水温升高时水分在土壤中扩散率变大.所以,随着入渗水温的不断升高,入渗到特定

深度所需时间逐渐减小.特定深度以滴头为坐标原点,按照水平向左和垂直向下为正所建立的坐标系中的点  $A(6,5), B(6,10), C(12,10), D(12, 15)$  来表示,即 Watchdog 水分传感器探头的位置.当水分运动到探头处时,Watchdog 显示的数值会发生变化,可认为此刻水分运动到该处.水温为  $4^{\circ}\text{C}$  时,水分入渗到点  $A, B, C, D$  的时间分别为  $31, 100, 150, 252 \text{ min}$ ,当水温升高到  $20^{\circ}\text{C}$  时,入渗

时间分别减少  $5, 12, 12, 46 \text{ min}$ ,而  $40^{\circ}\text{C}$  水较  $4^{\circ}\text{C}$  水入渗时间分别减少  $8, 25, 34, 71 \text{ min}$ .另外,相同的入渗水温变化,引起的人渗时间的变化量并不相同,水温从  $20^{\circ}\text{C}$  升高到  $30^{\circ}\text{C}$ ,入渗到特定深度时间分别减少  $2, 8, 20, 20 \text{ min}$ ,而水温从  $30^{\circ}\text{C}$  升高到  $40^{\circ}\text{C}$ ,入渗到特定深度的时间分别减少  $1, 5, 2, 5 \text{ min}$ ,这说明不同水温入渗引起的人渗时间的变化量并不是按照水温的线性变化而变化.

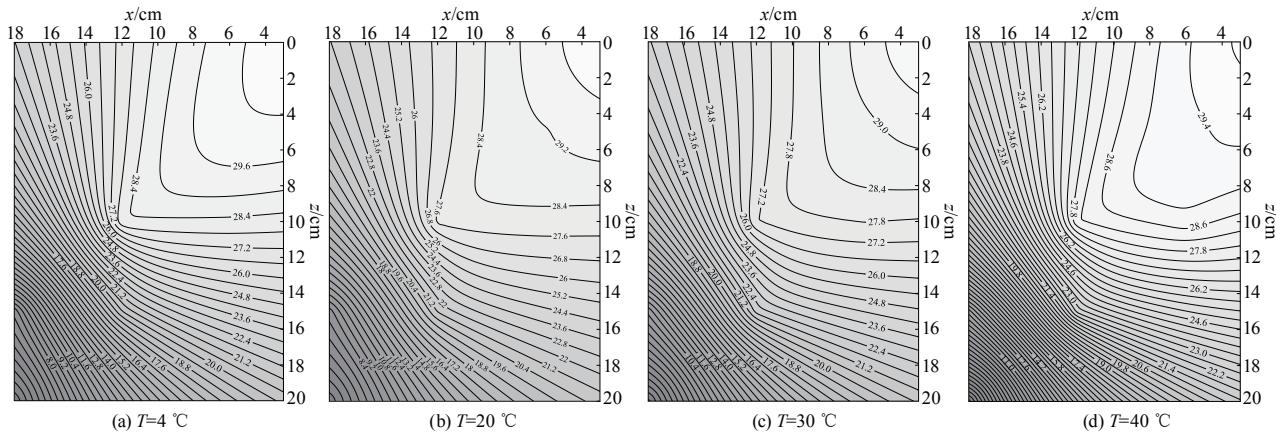


图 6 土壤湿润体内含水率分布等值线图  
Fig.6 Isopeth map of soil moisture content in wetted body

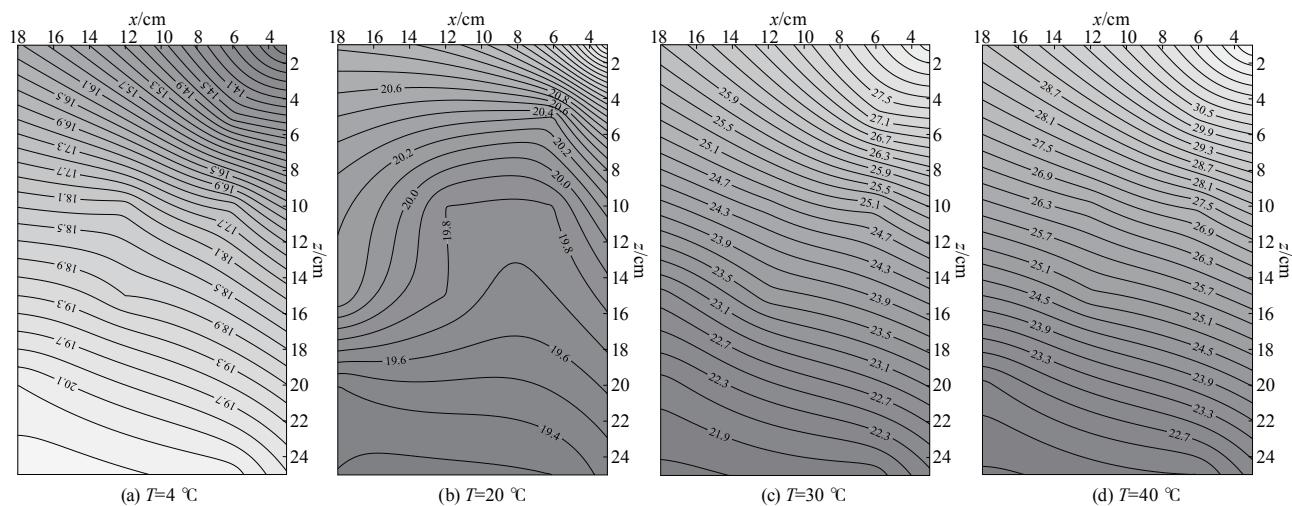


图 7 土壤湿润体内温度分布等值线图  
Fig.7 Isopeth map of temperature distribution in wetted body

不同的人渗水温改变了土层中的温度分布,使得各土层温度变化十分明显.通过 L93-8 型温度记录仪所读取的数据发现,对于 4 种不同温度水分入渗后其土层温度变化量:5 cm 深处,分别为  $-5.5, -0.3, 6.5, 10.7^{\circ}\text{C}$ ,即由入渗前的  $19.6^{\circ}\text{C}$  变为  $14.1, 19.3, 26.1, 30.3^{\circ}\text{C}$ ;10 cm 深处,由入渗前的  $19.6^{\circ}\text{C}$  变为  $16.9, 19.4, 23.9, 27.3^{\circ}\text{C}$ ,分别增加了  $-2.7, -0.2, 4.3, 7.7^{\circ}\text{C}$ .因此,入渗水温越高,对土

层温度的影响越大,随着土层深度的增加,在供水 400 min 内,以土表面至土面以下 15 cm 深度范围内的土温变化更为突出,随着土层深度的增加,由不同水温引起的土壤温度的变化量逐渐减小,在 25 cm 深处,土壤温度与入渗前变化不大,这是因为初始土壤温度一定,随着土层深度的增加由于水温和土温长时间的热传导现象致使水、土温差越来越小,致使土壤温度变化量减小.

### 3 讨论

文中通过室内土箱试验,针对滴灌条件下4种入渗水温对西安粉壤土水分入渗过程的影响进行了研究分析,重点研究了水温对入渗过程的影响及湿润体水分温度动态变化。温度对土壤水分性质、土壤结构、微生物活动及水汽扩散等过程有着重要的影响<sup>[2, 12]</sup>。由于本次研究是通过室内试验得出的试验性结论,研究条件与田间实际的复杂情况存在一定差异,所以研究结果仅可作为野外研究的参考。若用此结论指导农业灌溉,需要进行大田试验研究,同时需要考虑作物腾发、大气温度和湿度等因素的影响。同时,本次研究结果是通过短期试验得出的,有待于延长试验周期,做进一步深入的研究。灌溉水温越高,土壤水入渗越深,灌水温度对灌水质量和作物耗水能力以及作物产量等影响的研究尚欠缺。

### 4 结论

1) 不同水温滴灌条件下土壤水分入渗的湿润体形状近似为扁椭球体。建立了滴灌条件下不同温度水分入渗时水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间和水温的幂函数关系模型,其相关关系显著。

2) 水温对滴灌土壤水分的入渗能力有较大影响。在相同的入渗时间内,水温越高,滴头流量越大。湿润体的平均含水量与入渗水温和时间密切相关,入渗水温越高,湿润体平均含水量越小。

3) 水温对湿润体内水分和温度的分布均有较大影响。含水率等值线随着到滴头距离的由近到远而从疏到密分布,离滴头越近,土壤含水率越高;随着入渗水温的不断升高,入渗到同一深度所需时间逐渐减少,对土层温度的影响越大;在入渗400 min内以土表面至土面以下15 cm深度范围内的土温变化更为突出,在25 cm深处,土层温度与入渗前变化不大。

### 参考文献(References)

- [1] 王久龙,王振华,李文昊,等.灌溉水温对土壤水分入渗及分布的影响[J].中国农学通报,2014,30(35):185-189.  
WANG Jiulong, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. The effects of irrigation water temperature on the infiltration and distribution of soil water [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2014, 30 (35) : 185-189. (in Chinese)
- [2] 辛继红,高红贝,邵明安.土壤温度对土壤水分入渗的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):217-220.  
XIN Jihong, GAO Hongbei, SHAO Ming'an. Study of the effect of soil temperature on soil water infiltration [J]. Journal of soil and water conservation, 2009, 23 (3) : 217-220. (in Chinese)
- [3] 李久生,栗岩峰,王军,等.微灌在中国:历史、现状和未来[J].水力学报,2016,47(3):372-381.  
LI Jiusheng, LI Yanfeng, WANG Jun, et al. Microirrigation in China: history, current situation and prospects [J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 47 (3) : 372-381. (in Chinese)
- [4] BHATNAGER P R, CHAUHAN H S. Soil water movement under a single surface trickle source[J]. Agriculture water management, 2008, 95(7):799-808.
- [5] SUBBAIAH R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation [J]. Irrig sci, 2013, 31(3):225-258.
- [6] ELMALOGLOU S, DIAMANTOPOULOS E, DERCAS N. Comparing soil moisture under trickle irrigation modeled as a point and line source[J]. Agricultural water management, 2010, 97(3): 426-432.
- [7] 刘显,费良军,刘扬.涌泉根灌交汇入渗对土壤水氮运移特性的影响[J].排灌机械工程学报,2017, 35 (3) : 263-270.  
LIU Xian, FEI Liangjun, LIU Yang. Effects of bubbled-root irrigation interference infiltration on transport characteristics of water and nitrogen [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2017, 35 (3) : 263-270. (in Chinese)
- [8] 张智韬,吴普特,陈俊英,等.涌泉根灌土壤湿润体运移模型[J].排灌机械工程学报,2013, 31 (2) : 173 -179.  
ZHANG Zhitao, WU Pute, CHEN Junying, et al. Prediction model of wetted front migration distance under bubbled-root irrigation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(2) : 173-179. (in Chinese)
- [9] 高艳娟,樊贵盛,胡婧娟.越冬期浅层潜水井水温问题研究[J].节水灌溉,2014(8):22-24,28.  
GAO Yanjuan, FAN Guisheng, HU Jingjuan. Study on water temperature issues of Shallow-layer phreatic well in wintering period [J]. Water saving irrigation, 2014(8) : 22-24,28. (in Chinese)
- [10] CHENG Huiyan, WANG Genxu, HU Hongchang, et al. The variation of soil temperature and water content of

- seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the head water region of the Yellow River, China [J]. Environmental geology, 2008, 54(8): 1755–1762.
- [11] 任杰,沈振中,赵坚,等.低温水入渗条件下土壤水分温度动态变化[J].水科学进展,2013,24(1):125–131.  
REN Jie, SHEN Zhenzhong, ZHAO Jian, et al. Dynamic variation of soil moisture and temperature under infiltration of low-temperature water [J]. Advances in water science, 2013, 24(1): 125–131. (in Chinese)
- [12] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):484–494.  
GAO Hongbei, SHAO Ming'an. Effect of temperature on soil moisture parameters [J]. Advances in water science, 2011, 22(4): 484–494. (in Chinese)
- [13] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32–35.  
LI Mingsi, KANG Shaozhong, SUN Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 32–35. (in Chinese)
- [14] 王旭,孙兆军,王正,等. Green-Ampt 入渗模型在龟裂碱土改良过程中的应用[J].江苏农业科学,2017,45(17):237–240.  
WANG Xu, SUN Zhaojun, WANG Zheng, et al. Application of Green-Ampt infiltration model in improvement process of takyric solonetz [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2017, 45(17): 237–240. (in Chinese)
- [15] 邢述彦.灌溉水温对冻融土入渗规律的影响[J].农业工程学报,2002,18(2):41–44.  
XING Shuyan. Influence of irrigation water temperature on the infiltration characteristics of frozen soils [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 41–44. (in Chinese)
- [16] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

(责任编辑 徐云峰)

(上接第 153 页)

- [7] 邓成香.螺旋槽干气密封流固耦合分析[D].昆明:昆明理工大学,2013.
- [8] 宋鹏云.螺旋槽上游泵送机械密封性能影响因素分析[J].润滑与密封,2001,26(2):50–53.  
SONG Pengyun. An analysis of factors affecting the characteristics of a upstream pumping mechanical seal [J]. Lubrication engineering, 2001, 26(2): 50–53. (in Chinese)

- [9] 杨玄.非牛顿流体在旋流器中流动特性的数值模拟[D].青岛:中国石油大学,2010.

(责任编辑 朱漪云)