

滴灌条件下水土温度对覆砂土壤水热运移影响的数值模拟

虎军宏, 赵文举, 刘贵元, 胡家珍

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为探究滴灌条件下水温与土温对覆砂土壤水热运移规律的影响, 基于 HYDRUS-2D 构建了不同水土温度土壤水热运移数值模型, 模拟分析了不同水土温度对覆砂土壤水分、温度动态变化的影响。结果表明: 灌溉水温对土壤水热分布影响显著, 随着温度升高, 土壤湿润体内含水率减小, 表现为 35 °C 水温 < 20 °C 水温 < 5 °C 水温, 灌溉水温对土壤剖面温度分布也有较大影响, 表层 0—15 cm 范围内温度变化了 5~10 °C。相同水温条件下, 随着土壤温度升高, 土壤饱和导水率增大, 湿润土体内体积含水率减小, 表现为 30 °C 土壤温度 < 15 °C 土壤温度 < 5 °C 土壤温度。滴灌水平和垂直湿润锋运移距离随温度升高而增大, 湿润锋运移距离与时间符合幂函数 $F = at^b$, 决定系数 R^2 介于 0.977 4~0.999 6, 并建立了水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间和温度的关系模型。以期为西北干旱地区砂石覆盖生态农业的合理补灌提供理论指导。

关键词: 覆砂; 灌溉水温; 土壤温度; 湿润锋; 数值模拟

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0349-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.048

Numerical Simulation of the Influence of Water and Soil Temperature on Water and Heat Transfer of Sand Mulching Soil Under Drip Irrigation

HU Junhong, ZHAO Wenju, LIU Guiyuan, HU Jiazhen

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

Abstract: In order to explore the influence of water temperature and soil temperature on the water and heat transfer of sand mulched soil under the condition of drip irrigation, a numerical model of water and heat transfer of soil with different water and soil temperature was built based on HYDRUS-2D, and the influence of different water and soil temperature on the dynamic change of water and temperature of sand mulched soil was simulated and analyzed. The results showed that the irrigation water temperature has a significant effect on the distribution of soil water and heat. With the increase of temperature, the moisture content in the soil decreased, which shows that the water temperature of 35 °C < 20 °C < 5 °C. The irrigation water temperature also had a great influence on the distribution of soil profile temperature, and the temperature changed 5~10 °C in the range of 0—15 cm in the surface layer. Under the same water temperature, with the increase of soil temperature, the saturated hydraulic conductivity of the soil increased, and the volume moisture content of the wet soil decreased, which showed that the soil temperature of 30 °C < 15 °C < 5 °C. The migration distance of horizontal and vertical wetting front of drip irrigation increased with the increase of temperature. The migration distance and time of wetting front accorded with the power function $F = at^b$, and the determination coefficient R^2 was between 0.977 4 and 0.999 6. We established the relationship model between the migration distance of horizontal and vertical wetting front and infiltration time and temperature, in order to provide theoretical guidance for the reasonable supplement irrigation of the sand and gravel mulched ecological agriculture in the arid area of Northwest China.

Keywords: sand mulching; irrigation water temperature; soil temperature; wetting front; numerical simulation

适宜的土壤水热条件是作物生长的重要环境因子, 灌溉对土壤水热环境会产生直接影响, 研究灌溉水温与土壤温度对土壤水热运移的影响具有现实意义^[1-2]。在

中国北方地区, 土壤温度随季节变化, 而灌溉水温也随着季节的不同而有所差异, 春季融雪时的灌溉水温为冰水混合物的温度, 温度接近 0, 而夏季的滴灌水温最高达

40 °C^[2]。土壤中水分运动和温度分布是相互联系的,土壤温度的变化会引起土壤水的物理化学性质的变化,从而引起土壤水分运动参数及其基质势的变化^[3]。Philip 等^[4]最早定量研究了温度对土壤水势的影响,认为温度每升高 0.002 °C,湿润锋处土壤吸力降低 1 cm。辛继红等^[5]通过入渗试验发现,在相同入渗时间下,土壤温度越高,湿润锋距离越远,湿润锋前进速率越大。Gao 等^[6]研究发现,温度变化对土壤水动力特性的影响包括运动黏度、表面张力和水的密度。

HYDRUS 软件是用于模拟饱和-非饱和介质水热、溶质运移的有限元软件,被广泛运用于土壤水分运移和热运移研究^[7-8]。Qiu 等^[9]利用具有校准参数的 HYDRUS-2D 模型探讨了温室大棚沟灌番茄的最优灌溉制度。Ren 等^[10]通过土槽试验和 HYDRUS-2D 模型分析了不同水温、水头和辐射组合下的热动力变化规律。王建东等^[11]通过与试验的测量数据进行比较,验证了 HYDRUS-2D 可以很好地描述地下滴灌土壤水分和热量传输特性。

覆盖引起的土壤温度变化对农业生产的影响越来越受到关注^[12-14]。土壤表层压砂作为一种古老的覆盖制度,在中国已有 300 多年的历史,土壤表层压砂可以提高降水利用率、抑制土壤蒸发、防止次生盐渍化、改善土壤理化性质,显著提高土壤储水量,保蓄土壤温度,最终提高作物产量^[15-16]。由于降雨具有偶然性,无法满足作

物生长期所需要的水分,导致产量降低,因此对压砂地采取合理的补灌措施显得尤为必要^[17]。滴灌作为一种节水灌溉方式,可根据作物生长状况随时进行水肥管理,有效提高水分利用效率。目前,国内外学者^[18-20]的研究集中于无覆盖和覆膜滴灌条件下土壤水热运移,而对覆砂土壤在不同灌溉水温和土壤温度条件下的水热运移较少关注。为此,本文基于 HYDRUS-2D 模拟分析了不同滴灌水温和土壤温度对覆砂土壤水分入渗规律的影响,揭示不同灌溉水温和土壤温度条件下的水分、温度变化,以期对西北旱区砂石覆盖农田进行合理的补灌措施提供理论依据。

1 土壤水热运移数值模型

1.1 模型参数

1.1.1 供试材料 模拟区域 0~10 cm 为覆盖砂石层,10~60 cm 为砂壤土,模拟中所采用的砂石和土壤为 2019 年 7 月在景泰县兰州理工大学试验基地附近所取的覆盖砂石和土壤,土壤中粒径为 $0 \text{ mm} < d \leq 0.01 \text{ mm}$, $0.01 \text{ mm} < d \leq 0.05 \text{ mm}$, $0.05 \text{ mm} < d \leq 2.00 \text{ mm}$ 的百分比分别为 23.13%, 57.13%, 19.74%。

1.1.2 土壤水热运移参数 土壤水力参数 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 和 K_s 由 HYDRUS-2D 软件的 Rosetta 模块,使用神经网络模型根据土壤的粒径分布预测土壤水力参数。土壤热运移参数为默认值。土壤水力参数和热运移参数见表 1 和表 2。

表 1 Rosetta 模块预测的土壤水力参数

供试材料	残余含水率 θ_r / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 θ_s / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	进气值倒数 α / (cm^{-1})	经验参数 n	饱和导水率 K_s / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
砂石层	0.0544	0.384	0.0302	4.705	1.0882
砂壤土	0.0352	0.382	0.0052	1.587	0.0780

表 2 土壤热运移参数

供试材料	Solid	Org	D_L	D_T	b_1	b_2	b_3	C_n	C_o	C_w
砂石层	0.57	0	5	1	4.92E+06	-5.20E+07	10.6E+08	6.91E+07	9.04E+07	1.50E+08
砂壤土	0.59	0	5	1	5.25E+06	8.49E+06	3.31E+07	6.91E+07	9.04E+07	1.50E+08

注: Solid 为土壤固相占总体积的比率; Org 为有机质占总体积的比率; D_L 为土壤纵向热扩散率(cm^2/s); D_T 为土壤横向热扩散率(cm^2/s); b_1 、 b_2 和 b_3 为热导率函数中系数; C_n 、 C_o 和 C_w 分别为土壤固相的热容、土壤有机质的热容和土壤液相的热容($\text{J}/(\text{g} \cdot \text{°C})$)。

1.2 初始条件和边界条件

HYDRUS-2D 模型计算域中,土壤初始含水率和温度在整个剖面均匀分布。模拟区域上边界饱和区和在滴灌过程中为随时间变化的通量边界,为第 3 类边界条件,温度边界为第 3 类边界条件,其余边界为第 2 类边界条件。综上,初始条件可表述为:

$$\theta(r, z, t) = \theta_0(r, z, 0), T(r, z, t) = T_0(r, z, 0),$$

$$0 \leq r \leq 50 \text{ cm}, 0 \leq z \leq 60 \text{ cm}, t = 0 \quad (1)$$

式中: $\theta_0(r, z, 0)$ 为土壤初始含水率(cm^3/cm^3); $T_0(r, z, 0)$ 为土壤初始温度($^{\circ}\text{C}$)。

边界条件可表述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} -K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = q(t), 0 \leq r \leq R_s, z = 60, t > 0 \\ -\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i + TC_w q_i n_i = T_0 C_w q_i n_i, \text{for } (x, z) \in \Gamma_c \\ \frac{\partial h}{\partial z} = 0, 0 \leq r \leq 50, t > 0 \\ \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i = 0, \text{for } (x, z) \in \Gamma_c \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $K(h)$ 为土壤非饱和导水率(cm/min); h 为土壤负压水头(cm); $q(t)$ 为灌水过程中进水边界的通量(cm/min), $q(t) = Q(t)/\pi R_s^2$, $Q(t)$ 为滴头流量

(L/min), R_s 为灌水饱和区半径(cm); r 为径向坐标(cm); z 为垂向坐标(cm); λ_{ij} 为土壤导热率(J/(cm · K)); C_w 为液体比热容(J/(g · K)); q_i 为水分通量(cm); T 为土壤温度(K); Γ_c 为 Cauchy 边界。

2 结果与分析

2.1 滴灌水温和覆砂土壤水热分布的影响

土壤温度为 15 °C 时不同水温滴灌条件下土壤水热分布见图 1 和图 2。由图 1 可知,土壤剖面含水率随着滴头距离增加逐渐减小,距离滴头越近,土壤含水率越高。相同土壤温度条件下,随着入渗水温的升高,剖面同一位置土壤含水率逐渐减小,表现为 35 °C

水温 < 20 °C 水温 < 5 °C 水温,这与文献[19]的结论一致。这是由于温度梯度产生的吸力梯度,使高温区水分向低温区迁移。

由图 2 可知,在相同土壤温度条件下,不同水温滴灌均显著改变了土壤剖面温度,使滴头附近温度变化了 5~10 °C,尤其是土壤表层 0—15 cm 范围内。随着滴头距离和土层深度增加,温度改变幅度减小。低温水入渗使土壤表层温度显著降低,表明低温水入渗带走了土壤中的热量,高温水入渗与前者相反。已有研究[12]表明,生育期土壤温度升高,可以显著促进作物生长发育。因此,在土壤温度较低的情况下,用高温水灌溉改善土壤温度可有效促进作物的生长。

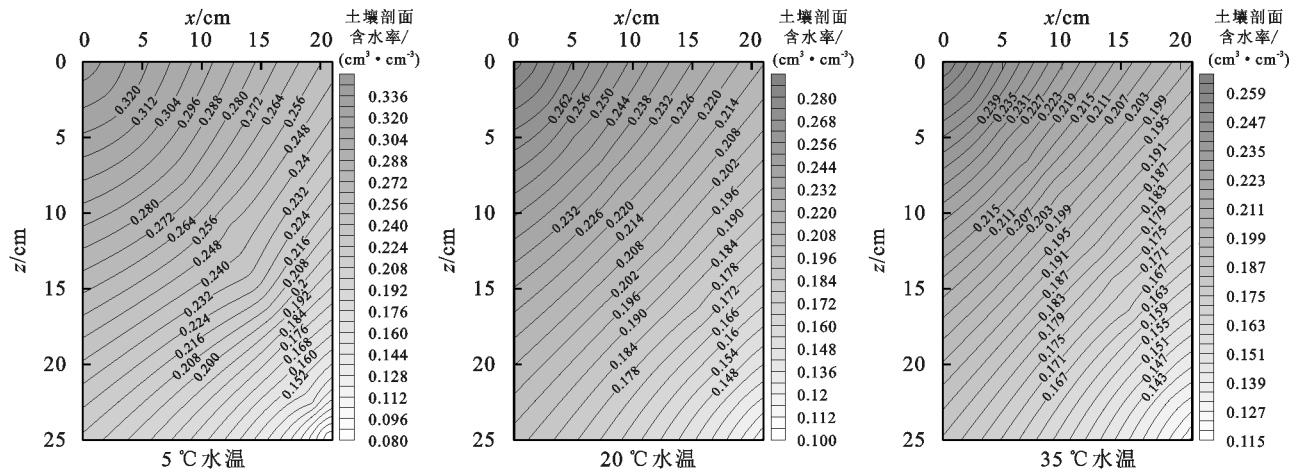


图 1 土壤温度为 15 °C 时不同水温滴灌条件下含水率分布等值线图

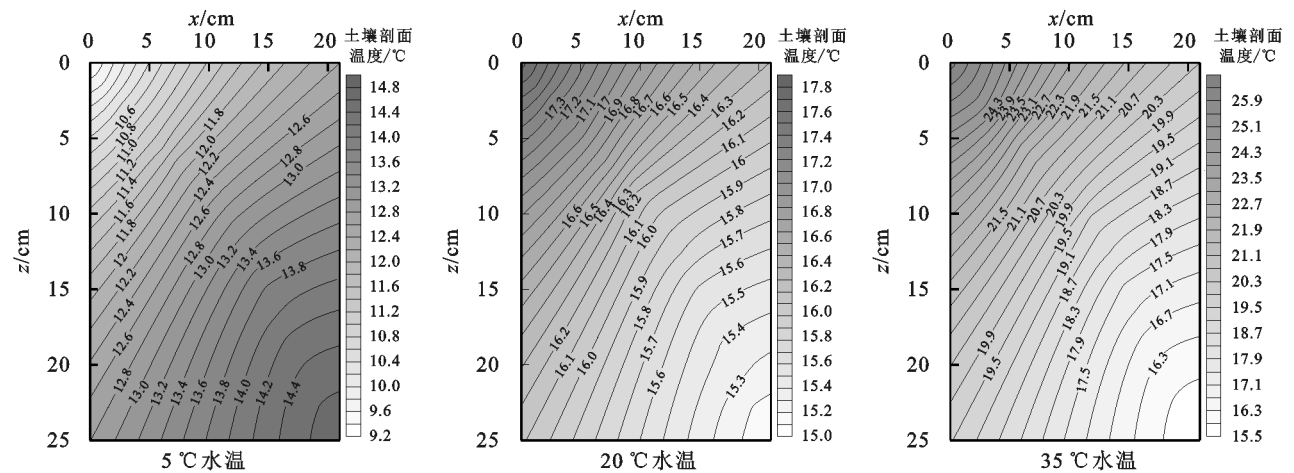


图 2 土壤温度为 15 °C 时不同水温滴灌条件下温度分布等值线图

2.2 土壤温度对覆砂土壤水热分布的影响

滴灌水温为 20 °C 时不同土壤温度条件下的土壤水热分布见图 3 和图 4。由图 3 可知,相同滴灌水温条件下,随着土壤温度升高,土壤剖面含水率降低,表现为 30 °C 土壤温度 < 15 °C 土壤温度 < 5 °C 土壤温度。这是由于随着土壤温度升高,水分在土壤孔隙中扩散速率加快,且随着温度升高,土壤的饱和导水率会随之增大,从而使湿润土体内平均体积含水率减小,这与文献[6]的结论一致。

由图 4 可知,20 °C 水温滴灌条件下,由于土壤温度和滴灌水温之间存在温度差,土壤温度低于滴灌水温时,土壤剖面温度随着水分入渗逐渐升高,土壤温度高于滴灌水温时,土壤剖面温度随着水分入渗逐渐降低。随着滴头距离和土层深度增加,温度变幅减小。土壤温度的升高会缩短发芽期和幼苗出苗,加速根系生长,有利于作物早熟[12]。中国北方地区,春季和冬季土壤温度较低,灌溉时采用较高温度的水,可有效改善根区土壤温度状况。

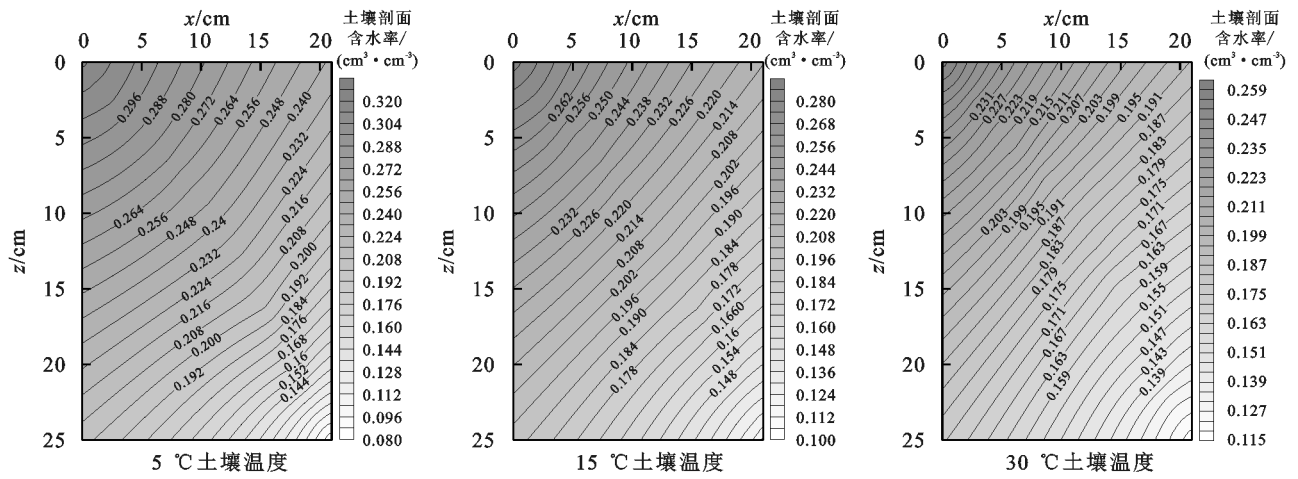


图 3 不同土壤温度在滴灌水温为 20 °C 时的含水率分布等值线图

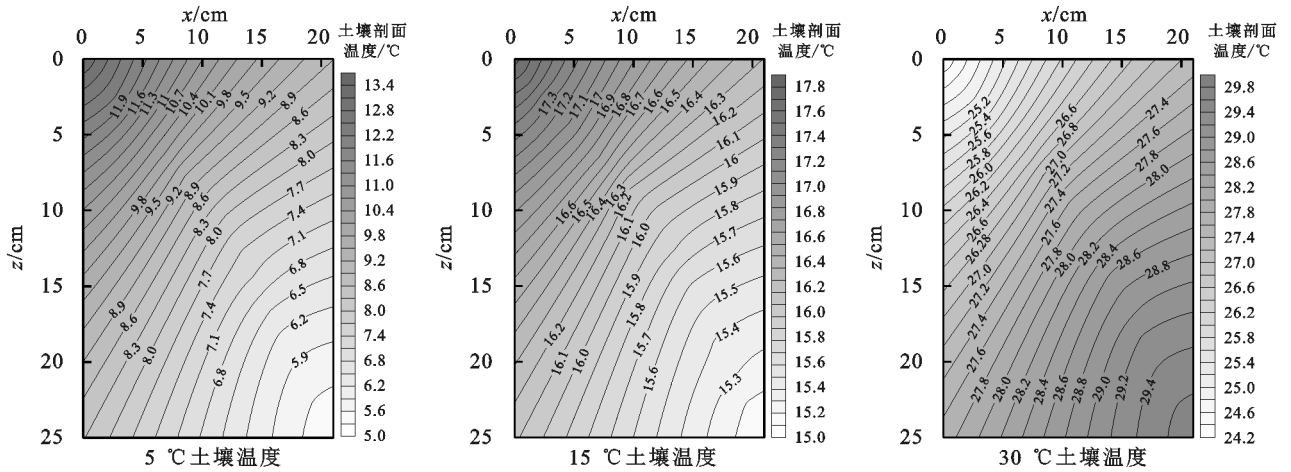


图 4 不同土壤温度在滴灌水温为 20 °C 时的温度分布等值线图

2.3 温度对湿润锋的影响

2.3.1 滴灌水温对湿润锋的影响 图 5 为土壤温度 15 °C 时不同滴灌水温条件下湿润锋随时间的变化。湿润锋运移距离随着滴灌水温升高而增大,湿润锋运移距离与时间的关系可用幂函数表示为:

$$F = At^B \quad (3)$$

式中: F 为湿润锋距离(cm); t 为入渗时间(min); A 、 B 为拟合参数。

3 种滴灌水温湿润锋拟合关系见表 3, 决定系数 R^2 均大于 0.98, 表明幂函数模型相关关系显著, 这与文献[19]的结论一致。随着水温的升高, 参数 A 逐渐增大, 参数 B 基本不变, 说明参数 A 对湿润锋运移影响大于参数 B 。

水平湿润锋拟合参数 B 保持在 0.35 左右, 垂直湿润锋拟合参数 B 保持在 0.56 左右, 将水平和垂直湿润锋拟合参数 B 分别取为 0.35 和 0.56, 对不同水温条件下湿润锋运移距离与时间进行线性拟合。图 5(c)、图 5(d) 为 3 种滴灌水温条件下水平和垂直湿润锋随时间 $t^{0.35}$ 和 $t^{0.56}$ 的变化, 拟合结果见表 3, 决定系数 R^2 均大于 0.99, 说明建立的线性模型相关性显著。

由表 3 可知, 系数 k 随着水温升高而增大, 按幂

函数对系数 k 和温度 T 进行拟合, 结果为:

$$k = 3.8526T^{0.0436} (R^2 = 0.9635) \quad (4)$$

$$k = 0.9785T^{0.0624} (R^2 = 0.9900) \quad (5)$$

将公式(4)和公式(5)代入 $F_x = kt^{0.35}$ 和 $F_z = kt^{0.56}$ 中, 可以建立滴灌条件下不同水温入渗时湿润锋运移距离 F 与入渗时间 t 以及水温 T 的关系模型为:

$$F_x = 3.8526T^{0.0436}t^{0.35} \quad (6)$$

$$F_z = 0.9785T^{0.0624}t^{0.56} \quad (7)$$

对公式(6)和公式(7)用 15 °C 滴灌水温条件进行检验。由图 6 可知, 公式(6)和公式(7)可以较好地拟合湿润锋运移距离和入渗时间及灌溉水温的关系。

2.3.2 土壤温度对湿润锋的影响 图 7 为 20 °C 水温滴灌时, 3 种土壤温度条件下湿润锋随时间的变化, 由图 7(a)、图 7(b)可知, 在相同入渗水温条件下, 土壤温度越高, 湿润锋运移距离越远, 湿润锋到达设定位置的时间越短, 这与文献[5]的结论一致。用幂函数关系 $F = at^b$ 对不同土壤温度下的湿润锋运移距离与时间进行拟合。由表 4 可知, 3 种土壤温度条件下的湿润锋运移距离与时间拟合的 R^2 在 0.97 以上, 并且随着土壤温度升高, 参数 a 逐渐增大, 参数 b 基本不变, 说明参数 a 对湿润锋的影响大于参数 b 。

水平湿润锋拟合参数 b 稳定在 0.35 左右,垂直湿润锋拟合参数 b 稳定在 0.56 左右。将水平和垂直湿润锋拟合参数 b 分别取为 0.35 和 0.56,对 3 种土壤温

度条件下的湿润锋距离与时间 $t^{0.35}$ 和 $t^{0.56}$ 进行拟合,拟合结果见图 7(c)、图 7(d)和表 4,决定系数 R^2 均大于 0.98,说明该线性模型相关关系显著。

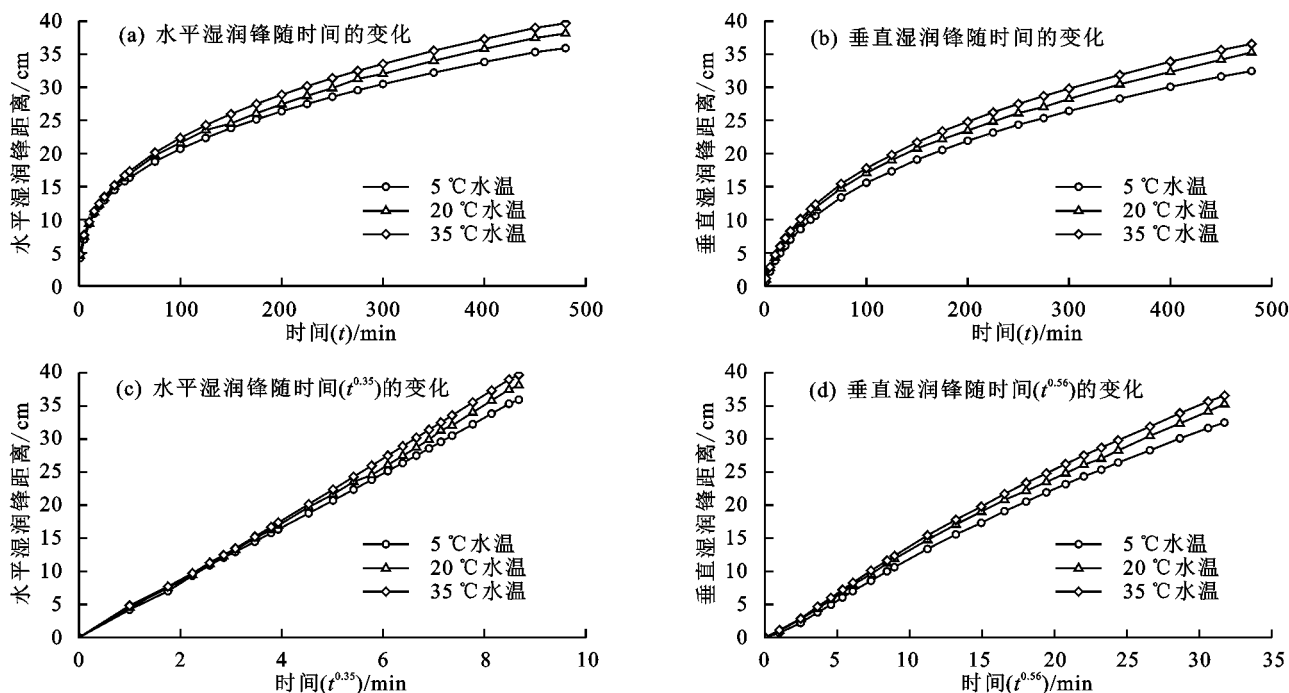


图 5 不同滴灌水温和条件下湿润锋随时间的变化

表 3 不同滴灌水温和条件下湿润锋运移距离与时间的关系参数表

滴灌 水温 $T/^\circ\text{C}$	水平湿润锋运移距离 F_x					垂直湿润锋运移距离 F_z				
	$F_x = At^B$			$F_x = kt^{0.35}$		$F_z = At^B$			$F_z = kt^{0.56}$	
	A	B	R^2	k	R^2	A	B	R^2	k	R^2
5	4.1715	0.3488	0.9996	4.1443	0.9999	0.9158	0.5988	0.9897	1.0841	0.9928
20	4.3268	0.3503	0.9993	4.3490	0.9994	1.1981	0.5623	0.9936	1.1714	0.9909
35	4.4259	0.3533	0.9983	4.5299	0.9990	1.2850	0.5577	0.9945	1.2278	0.9903

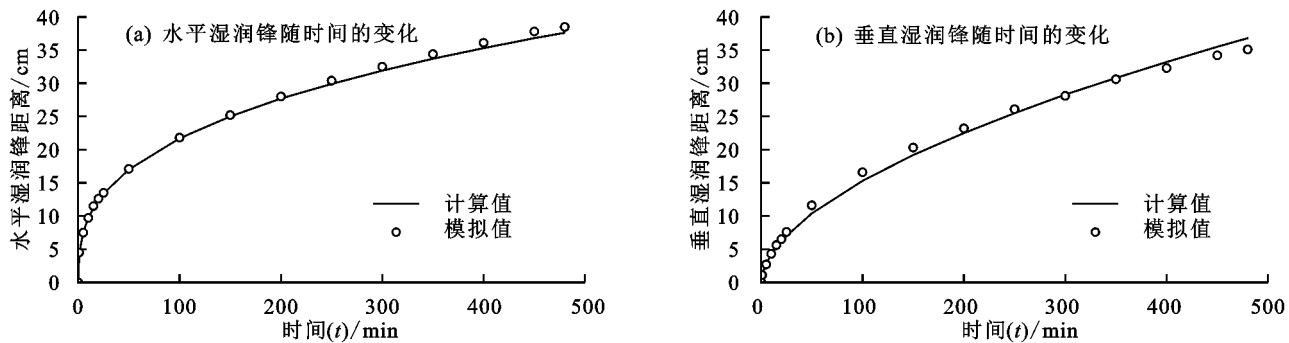


图 6 15 °C 水温滴灌入渗时的湿润锋运移变化

表 4 不同土壤温度条件下湿润锋运移距离与时间的关系参数表

土壤 温度 $T/^\circ\text{C}$	水平湿润锋运移距离 F_x					垂直湿润锋运移距离 F_z				
	$F_x = at^b$			$F_x = Ct^{0.35}$		$F_z = at^b$			$F_z = Ct^{0.56}$	
	a	b	R^2	C	R^2	a	b	R^2	C	R^2
5	3.6250	0.3694	0.9924	3.9765	0.9993	0.7329	0.6327	0.9774	1.0256	0.9922
15	4.3268	0.3503	0.9993	4.3490	0.9994	1.1981	0.5623	0.9936	1.1714	0.9909
30	4.5994	0.3444	0.9974	4.4922	0.9996	1.4575	0.5354	0.9966	1.2405	0.9878

由表 4 可以看出,系数 C 随着土壤温度升高逐渐增大,按照幂函数关系对系数 C 和温度 T 进行拟合,结果为:

$$C = 3.5703T^{0.0693} (R^2 = 0.9821) \quad (8)$$

$$C = 0.8662T^{0.1075} (R^2 = 0.9909) \quad (9)$$

将公式(8)和公式(9)代入 $F_x = Ct^{0.35}$ 和 $F_z =$

$Ct^{0.56}$ 中,可建立不同土壤温度滴灌条件下湿润锋运移距离 F 与时间 t 以及土壤温度 T 的关系模型为:

$$F_x = 3.5703T^{0.0693}t^{0.35} \quad (10)$$

$$F_z = 0.8662T^{0.1075}t^{0.56} \quad (11)$$

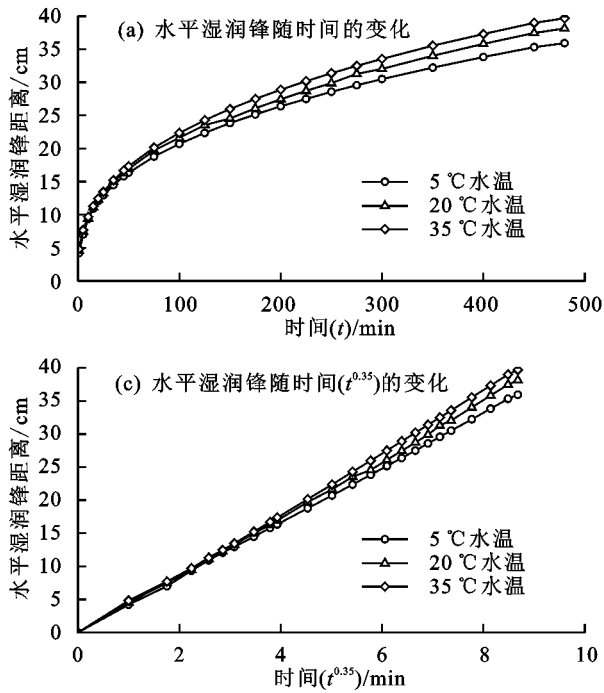


图 7 不同土壤温度条件下湿润锋随时间的变化

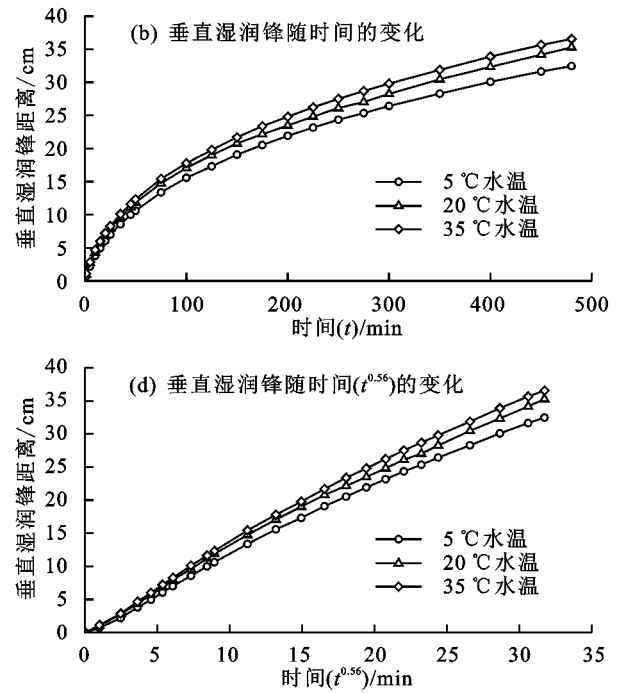
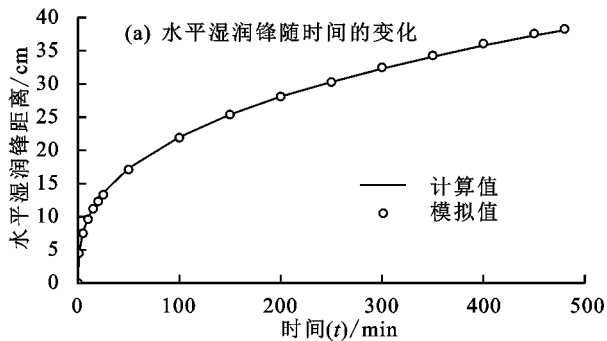


图 8 20 °C 土壤温度入渗时的湿润锋运移变化

3 结论

(1) 相同土壤温度条件下,灌溉水温对土壤水分分布影响显著,随着灌溉水温升高,土壤湿润体内含水率减小,表现为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水温 $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水温 $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水温,土壤表层 $0\text{--}15\text{ cm}$ 范围内温度变化了 $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 相同灌溉水温条件下,随着土壤温度升高,土壤导水率增大,土壤湿润体内含水率减小,表现为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤温度 $< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤温度 $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤温度,由于水温与土壤温度存在温度差,在水分入渗过程中,土壤剖面温度发生显著改变。

(3) 水温与土壤温度对滴灌土壤水分入渗有较大影响,滴灌水平和垂直湿润锋运移距离随温度升高而增大,湿润锋运移距离与时间符合幂函数 $F = at^b$,其决定系数 R^2 介于 $0.9774\text{--}0.9996$,并建立了水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间和温度的关系模型。

对公式(10)和公式(11)用 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤温度滴灌条件进行检验。由图 8 可知,公式(10)和公式(11)可以较好地拟合湿润锋运移距离和入渗时间及土壤温度的关系。

参考文献:

- [1] 张治,田富强,钟瑞森,等.新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J].农业工程学报,2011,27(1):44-51.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Philip J R, De Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient[J].Eos Transactions American Geophysical Union,1957,38(2):222-232.
- [5] 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.
- [6] Gao H B, Shao M A. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties[J].Soil and Tillage Research, 2015,153:145-154.

- [3] 梁止水. 砒砂岩抗蚀促生技术研发[D].南京:东南大学,2018.
- [4] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-941.
- [5] Xu X Z, Zhang H W, Zhang O Y. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science & Policy, 2004,7(2):79-86.
- [6] Yang F S, Cao M M, Li H E, et al. Simulation of sediment retention effects of the single seabuckthorn flexible dam in the Pisha Sandstone area[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(3):228-237.
- [7] Gao W M, Wu Z R, Wu Z S. Study of mechanism of the W-OH sand fixation[J]. Journal of Environmental Protection, 2012,3(9):1025-1033.
- [8] Liang Z S, Wu Z R, Mohammad N, et al. A new ecological control method for Pisha sandstone based on hydrophilic polyurethane[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(5):790-796.
- [9] 梁止水,吴智仁,杨才千,等.基于W-OH的砒砂岩抗蚀促生机理研究[J].水利学报,2016,47(9):1160-1166.
- [10] 张冠华,孙金伟,牛俊,等.W-OH固化剂对玉米生长及土壤养分淋失的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):250-255,262.
- [11] Liang Z S, Liu H W, Zhao Y B, et al. Effects of rainfall intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(15):17458-17467.
- [12] 唐科明,张光辉,任宗萍,等.坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J].水土保持学报,2011,25(4):46-49.
- [13] 丁文峰,李占斌,崔灵周.黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2001,15(2):99-101.
- [14] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等.估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J].农业工程学报,2014,30(15):174-181.
- [15] 祝亚云,曹龙熹,吴智仁,等.新型W-OH材料对崩积体土壤分离速率的影响[J].土壤学报,2017,54(1):73-80.
- [16] 罗婷,王文龙,王贞,等.非硬化土路土壤剥蚀率与水动力学参数分析[J].人民黄河,2011,33(4):96-98.
- [17] 朱秀迪,丁文峰,张冠华,等.新型水溶性聚氨酯对紫色土坡面产流产沙的影响[J].长江科学院院报,2018,35(1):47-51.
- [18] 田风霞,王占礼,牛振华,等.黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):145-150.
- [19] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill-slope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.
- [20] 雷廷武.流域水土流失模拟方法[M].北京:科学出版社,2015.
- [21] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J].农业工程学报,2006,22(2):85-187.
- [22] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.

(上接第354页)

- [7] 潘梦绮,黄权中,冯榕,等.基于热示踪的饱和层状介质水热参数反演[J].水利学报,2017,48(11):1363-1372.
- [8] Rai V, Pramanik P, Das T K, et al. Modelling soil hydrothermal regimes in pigeon pea under conservation agriculture using Hydrus-2D [J]. Soil and Tillage Research, 2019,190:92-108.
- [9] Qiu R J, Du T S, Kang S Z. Root length density distribution and associated soil water dynamics for tomato plants under furrow irrigation in a solar greenhouse[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(5):637-650.
- [10] Ren J, Wang X P, Shen Z Z, et al. Heat tracer test in a riparian zone: Laboratory experiments and numerical modeling[J]. Journal of Hydrology, 2018,563:560-575.
- [11] 王建东,龚时宏,马晓鹏,等.地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证[J].水利学报,2010,41(3):368-373.
- [12] Bu L D, Liu J L, Zhu L, et al. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2013, 123(10):71-78.
- [13] Zhao W J, Yu P, Ma X Y, et al. Numerical simulation of soil evaporation with sand mulching and inclusion [J]. Water, 2017,9(4):1-10.
- [14] 陈光杰,冯浩,吴淑芳,等.垄膜沟秸秆种植方式对夏玉米水热效应的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):162-168.
- [15] 王冬林,冯浩,李毅,砾石覆盖对土壤水热过程及早作小麦玉米产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(7):132-139.
- [16] Zhao W J, Cui Z, Zhang J Y, et al. Temporal stability and variability of soil-water content in a gravel-mulched field in northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2017,552:249-257.
- [17] 赵文举,郁文,范严伟,等.滴灌条件下压砂对土壤水分入渗的影响[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):56-60.
- [18] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.干旱区大田玉米膜下滴灌土壤水热效应研究[J].水土保持学报,2017,31(1):172-178.
- [19] 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.
- [20] Joel R C, Lincoln Z, Michael D D, et al. Soil moisture distribution under drip irrigation and seepage for potato production[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169:183-192.