

DOI: 10.5846/stxb201305311256

王科锋, 梁银丽, 张朝文, 穆兰, 石国华. 栽培番茄的塿土和黄绵土水分和温度变化规律. 生态学报, 2015, 35(7): 2161-2169.

Wang K F, Liang Y L, Zhang C W, Mu L, Shi G H. The periodicities of water content and temperature variation for tomatoes in the cumelic cinnamon soils and the loessial soils. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2161-2169.

栽培番茄的塿土和黄绵土水分和温度变化规律

王科锋¹, 梁银丽^{1,2,*}, 张朝文¹, 穆 兰², 石国华¹

¹ 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

² 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 用土柱试验, 研究了栽培樱桃番茄 (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* Alef.) 的塿土和黄绵土水分运移和温度变化规律, 水分运移模型选用土壤中水分分布的动力学模型, 土壤温度、空气温湿度变化选用正弦曲线模型。结果表明: 塿土在各个不同深度的平均含水量均高于黄绵土, 塿土的入渗速率高于黄绵土, 同一深度塿土温度高于黄绵土, 土壤温度随着深度的增加具有明显的滞后性; 黄绵土中樱桃番茄的水分利用效率大于塿土, 空气温湿度、土壤温度和土壤含水量相互影响。水分运移模型在土壤浅层处可以得到很好的拟合效果, 在拟合方程的变量范围内, 根据时间可以较准确的确定樱桃番茄盛果期土壤浅层含水量, 对于进一步提高农业干旱防御能力、有效制定节水灌溉计划、提高水分利用效率提供了理论依据。

关键词: 土壤水分运移; 塿土; 黄绵土; 温度; 樱桃番茄

The periodicities of water content and temperature variation for tomatoes in the cumelic cinnamon soils and the loessial soils

WANG Kefeng¹, LIANG Yinli^{1,2,*}, ZHANG Chaowen¹, MU Lan², SHI Guohua¹

¹ Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: In this paper we report the findings from experiments using soil columns to investigate changes in water content and temperature in cumelic cinnamon soils and loessial soils which were used to grow cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* Alef.). A mathematical model for soil water distributions was used to simulate the vertical changes in soils water, and a sinusoid model was selected to analyse soil and air temperature as well as the changes in air humidity. The results show that the average soil water content and the infiltration rate in the cumelic cinnamon soils are higher than those in the loessial soils. The temperature in the cumelic cinnamon soils is higher than that in the loessial soils at the same depth. The soil temperature has obvious hysteresis as the depth increases. The water use efficiency of tomatoes in the loessial soils is higher than in the cumelic cinnamon soils. The air temperature, relative humidity, soil temperature and soil water content influence one another. The mathematical model in this study effectively simulates the water movement in the soil above 20 cm. Within the variable range of the variables in the mathematical equation, the water content in the small depths can be accurately determined using the elapsed time in the cherry tomatoes at the full fruit period, which provides a theoretical basis for improving the drought resistance, scheduling water-saving irrigation plans and improving water use efficiency.

Key Words: soil water movement; cumelic cinnamon soils; loessial soils; temperature; cherry tomatoes

西北地区是我国设施农业产业发展的优势地区, 水资源缺乏已成为制约该地区农业可持续发展的关键问题^[1]。到 2011 年底, 该地区设施农业总面积逾 40 万 hm^2 ^[2], 随着人民生活水平的提高, 樱桃番茄越来越受到人们的喜爱, 其栽培面积不断扩大^[3]。据统计, 目前陕西省番茄 (大果番茄和樱桃番茄) 年种植面积约 3.4 万

基金项目: 国家科技支撑课题 (2014B AD14B006)

收稿日期: 2013-05-31; 网络出版日期: 2014-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn

hm²(51 万亩)。番茄在陕西省各地均有分布,其中以咸阳、渭南、西安和宝鸡为主的关中地区占总分布面积的 70%,陕南占 20%,陕北占 10%^[4]。土壤水分是半干旱地区农业生态系统的主要限制因素^[5-6],是植被生长及分布的重要生态因子^[7]。它对土壤水-热-溶质耦合运移以及土壤-植被-大气传输体中的物质迁移过程具有重要影响^[8]。土壤水分管理是樱桃番茄高产栽培的关键技术,水分条件是影响其生理、产量与品质的主要因素。设施内传统的沟畦等地面灌水技术管理粗放,造成水资源和肥料的浪费,其有效水分利用率低^[9],而滴灌方式可以明显的提高水分利用效率。现代节水农业的发展不仅要追求高产,而且要追求尽可能高的作物水分利用效率^[10-11]。土壤温度随太阳辐射出现日内、月内和年内变化,虽然其变化受到土壤性质、土壤水分等多种因素影响,但表现出一定有规律的波动^[12]。林兴军^[13]等研究表明,土壤水分和肥料水平对土壤的日变化有重要影响。国内外专家对土壤中水分和温度的有关问题开展了大量研究,灌水后期上层土体水分含量的增加是下层土体水分在温度梯度驱动下向上层迁移造成的^[14]。土壤性质对土壤水分运移有很大的影响^[15],了解不同土壤水分运移对于决定水文过程和农田水分管理有重要意义^[16]。在半干旱气候条件下的黄土高原,面临着水分缺乏和种植面积不断扩大的矛盾^[17],黄绵土和塬土作为该地区主要分布的两种主要土壤,因此,研究作物生长条件下滴灌土壤水分运移和温度变化规律,对制定科学的灌溉制度和综合利用水、肥、气、热等资源具有重要的理论指导意义^[18]。本文通过研究黄绵土和塬土中水分运移和温度变化规律,为进一步提高农业干旱防御能力、有效制定节水灌溉计划、提高水分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012 年 4 月 28 日—9 月 19 日,在陕西杨凌西北农林科技大学水土保持研究所遮雨塑料薄膜的试验场的土柱(高 100cm,内径 32cm)中进行,土柱置于地下室水泥平台上。共 4 排土柱,每排 12 个,两排装黄绵土,两排装塬土,均按原状土容重分层装入。黄绵土质地轻,颜色浅,比热小,土温变幅大,属温性-中温性土壤;塬土主要分布于关中平原,母质为次生黄土,灰黄棕色,壤质粘土,粒状结构,疏松。部分理化性质如表 1 所示。试验设土壤 2 类:塬土(C)和黄绵土(L);土壤相对含水量设 3 个水平:90%—100%(Wh)、70%—80%(Wm)、50%—60%(Wl),共 6 个处理(CWh、CWm、CWl、LWh、LWm、LWl),每处理重复 8 次。

表 1 塬土和黄绵土的部分理化性质

Table 1 The partial physical and chemical properties of cumulic cinnamon soils and loessial soils

土壤性质 Soil properties	黄绵土 Loessial soil	塬土 Cumulic cinnamon soils
耕层容重 Topsoil capacity weight/(g/cm ³)	0.95	1.20
田间持水量 Field capacity/(g/kg)	220	240
有机质 Organic matter/(g/kg)	8.73	9.60
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.42	0.52
速效氮 Available nitrogen/(mg/kg)	9.78	9.57
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.56	0.64
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	24.75	26.93
速效钾 Available potassium/(mg/kg)	91.92	102.37
pH	7.2	7.9

1.2 试验材料

试验品种为千禧樱桃番茄。每个土柱施尿素(含 N 46.4%)、磷酸二铵(含 P₂O₅ 42%,N15%)、硫酸钾(K₂O 有效含量为 45%)各 2g 作为底肥,合 75kg/hm²。结果期每月每土柱追施尿素、磷肥、钾肥各 2g。2012 年 4 月 28 日定植,每土柱移栽 1 株 6 叶期樱桃番茄。定植后 10d 开始进行水分处理,之前各处理灌水量保持一致。

1.3 土壤含水量测定方法与灌水量

土壤含水量的测定:定植后 10d 用滴灌开始控水。用时域反射仪 TDR (Time Domain Reflectometer) 测定 10、20、30、40cm 土壤含水量,重复 3 次,取平均值。用各处理土壤含水量上限减去实测含水量得出需灌水量。土柱及测量水分图如图 1 所示。

试验在整个生长周期共测定 3 次水分运移动态,滴灌开始时间分别为 2012 年 7 月 5 日 8:00、7 月 26 日 8:00、8 月 25 日 8:00,灌水量以该时缺水量为准,测定时间分别为 2012 年 7 月 5 日 9:00—7 月 13 日 8:00、7 月 26 日 9:00—8 月 3 日 8:00、8 月 25 日 9:00—8 月 31 日 9:00,测定土壤水分垂直运移时,控制滴灌流速平均 1.16L/h,各处理播种前和收获时土壤储水量及生长期内灌水量如表 2 所示。

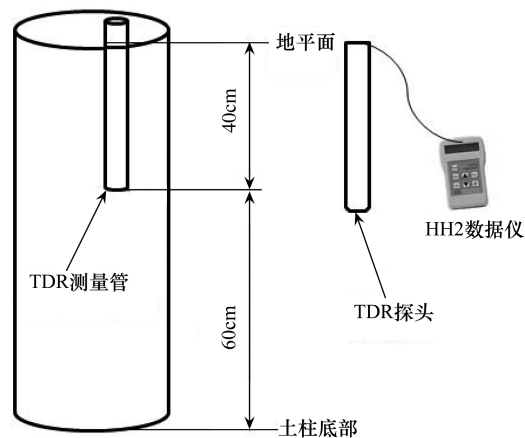


图 1 土壤水分测定图

Fig.1 Schematic view of soil moisture measurement

表 2 各处理生长期内灌水量

Table 2 The amount of irrigation under different treatment in the growth period

处理 Treatment	CWh/L	CWm/L	CWl/L	LWh/L	LWm/L	LWl/L
播前土壤储水 The water content before sowing	6.57	7.75	6.40	3.02	3.45	2.09
5 月 May	7.80	4.29	2.93	6.12	3.37	0.92
6 月 Jun	21.48	14.48	7.69	16.65	11.92	7.03
7 月 Jul	16.15	13.54	6.16	16.39	9.81	6.72
8 月 Aug	11.11	7.96	3.61	10.96	7.31	3.91
9 月 Sep	3.13	2.11	1.09	3.21	2.10	1.12
收获土壤储水 The water content after harvest	4.23	3.88	3.35	2.50	2.61	2.02
总耗水量 Total	62.01	46.25	24.53	53.85	35.35	19.77

CWh: 壤土高水处理 cumelic cinnamon soils with high water; CWm: 壤土中水处理 cumelic cinnamon soils with moderate water; CWl: 壤土低水处理 cumelic cinnamon soils with little water; LWh: 黄绵土高水处理 loessial soils with high water; LWm: 黄绵土中水处理 loessial soils with moderate water; LWl: 黄绵土低水处理 loessial soils with little water

1.4 空气温度、相对湿度、土壤温度测定

采用日产小型气象自动记录仪 HOB0 (HOB0 Pro v2 Temperature/RH Data Logger, 温度精度: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$; 相对湿度精度: $\pm 2.5\%$) 对 1.5m 高度处大气温度和大气相对湿度进行动态监测。

用土壤温度测定仪 (Thermo Recorder TR-52, accuracy $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) 测定 10、20、30、40cm 土层温度,每小时记录 1 次,从定植开始一直记录到植株生长期结束。

1.5 产量测定及水分利用效率

动态采摘生理成熟果实,记录每 1 株的产量及果实数。实验结束后,烘干法测量植株的生物量。水分利用效率=产量/灌水量。

1.6 数据统计分析

1.6.1 水分运移模型

选用土壤中水分垂直分布的动力学模型^[19]:

$$y = (a - be^{-cx})e^{-dx} + f \quad (a, b, c, f > 0)$$

式中, y 表示土壤含水量 (cm^3/cm^3), x 表示时间 (d), a, b, c, d, f 为待估参数。假设 $x=0$ 时, $y=0$, 则 $f=b-a$, 即模型变为:

$$y = (a - be^{-cx})e^{-dx} + b - a \quad (a, b, c > 0, b > a), \text{ 有 } \lim_{x \rightarrow +\infty} y = f = b - a$$

模型显然具有以下性质:

- (1) 具有水平渐近线 $y_h = f$
- (2) 极大值处时间 $x_m = (1/c) \times \ln[b(c+d)/ad]$
- (3) 极大值处土壤含水量 $y_m = y(x_m)$
- (4) 拐点处时间 $x^* = (1/c) \times \ln[b(c+d)^2/ad^2]$

对于同一植株而言,极大值处时间 x_m 之前水分含量的增加主要是受重力作用的影响,在 x_m 之后,水分含量主要是由于光照强度、大气温度、大气湿度、土壤温度、地表处 CO_2 浓度等的影响。 x_m 的大小主要受降雨的强弱或灌溉方式的影响,如果降雨很强,类似大暴雨或者大水漫灌, x_m 相对就小;如果降雨很弱,如绵绵细雨,或采用滴灌的方式, x_m 相对就比较大。水平渐近线 y_h 的大小主要受土壤类型和土壤深度等决定,土壤含水量一直减少,水平渐近线接近萎蔫系数,直到有降雨或者灌溉使上述过程再次开始循环。拐点处时间 x^* 表示土壤含水量经过极大值后由迅速下降转为逐渐稳定的时间点。此模型可以适用于农田、森林、草地等生态系统中表层土壤水分的运移研究。

1.6.2 温度变化模型^[12]

$$T(z, t) = T_A(z) + A(z) \sin[\omega t + \Phi(z)]$$

式中, $T_A(z)$ 为日或年平均温度, $A(z)$ 为温度变幅, $\Phi(z)$ 为相位, ω 为角频率, z 为深度。

所测结果运用数学软件 Mathematica 和 SPSS 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 壤土、黄绵土土壤水分运移规律

将 7 月 26 日—8 月 3 日所测的土壤含水量观测值和拟合方程曲线显示在图 2 中,可直观的看出土壤含水量观测值与拟合出的回归方程较一致,分别表示高水、中水和低水处理浅层各深度的土壤含水量观测值及观测值拟合出的回归方程曲线。

将 2012 年 7 月 5 日—7 月 13 日、7 月 26 日—8 月 3 日、8 月 25 日—8 月 31 日 3 次水分运移观测数据拟

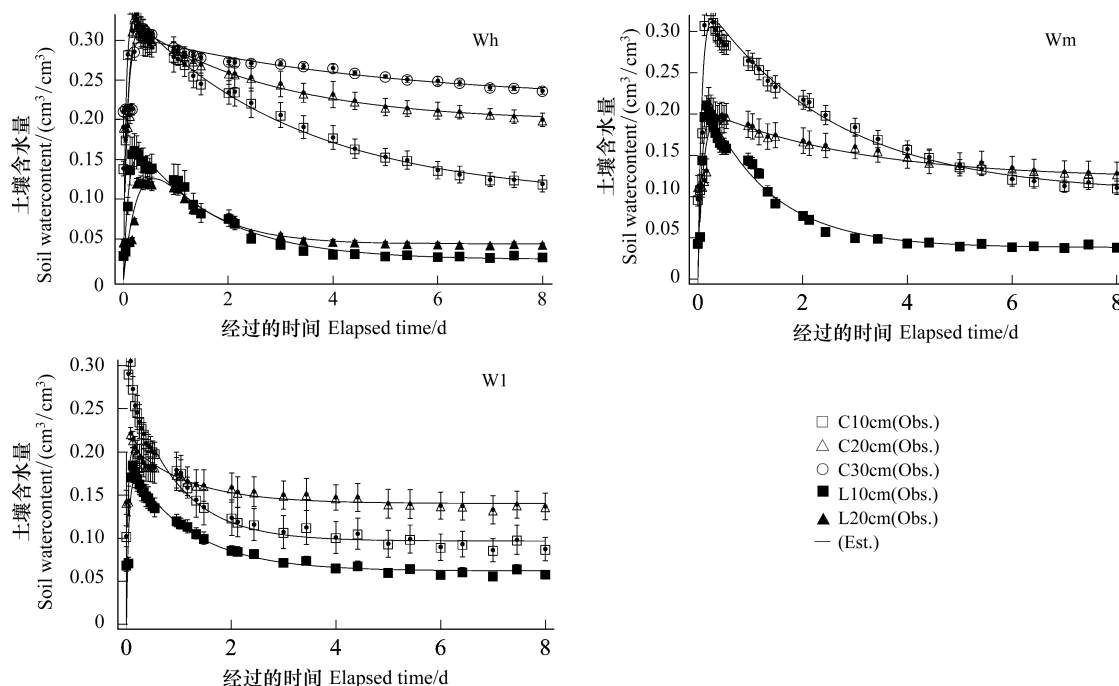


图 2 7 月 26 日—8 月 3 日壤土、黄绵土土壤水分运移规律

Fig.2 The regularity of water movement in the cumelic cinnamon soils and the loessial soils from July 26 to August 3

土壤相对含水量: Wh:高水 90%—100%; Wm:高水 70%—80%; Wl:高水 50%—60%

表 3 2012 年 7 月 5 日、7 月 26 日和 8 月 25 日 3 次水分运移拟合回归方程参数分析

Table 3 Variance analyses of fitting equation parameters from the observation data on July 5, July 26 and August 25, 2012

深度 Depths	处理 Treatment	拟合优度 R^2 Goodness-of-fit	拟合曲线方程 The fitting equation	拟合曲线水平 渐近线 y_h Horizontal asymptote of the fitting curve /(cm^3/cm^3)	土壤含水量达到最大 时经过的时间 x_m The elapsed time when the soil water content up to maximum/d	土壤含水量 最大值 y_m The maximum soil water content/ (cm^3/cm^3)	拟合曲线拐点 x^* The inflection point of the fitting curve/d
10cm	LWh	0.990±0.001	$y = (0.165 - 0.192e^{-9.685x})e^{-0.506x} + 0.027$	0.027±0.045	0.363±0.074	0.155±0.001	0.705±0.139
	CWh	0.989±0.005	$y = (0.186 - 0.33e^{-23.915x})e^{-0.368x} + 0.144$	0.145±0.027	0.211±0.031	0.314±0.011	0.396±0.059
	F	0.053ns		18.732 *	3.569ns	220.8 ***	4.152ns
	LWm	0.987±0.001	$y = (0.179 - 0.228e^{-12.344x})e^{-0.605x} + 0.049$	0.049±0.005	0.288±0.051	0.191±0.004	0.553±0.095
	CWm	0.988±0.002	$y = (0.205 - 0.353e^{-13.516x})e^{-0.762x} + 0.148$	0.148±0.034	0.293±0.057	0.308±0.004	0.541±0.114
	F	0.268ns		8.359 *	0.004ns	468.636 ***	0.006ns
	LWl	0.984±0.005	$y = (0.101 - 0.159e^{-18.571x})e^{-0.652x} + 0.058$	0.058±0.002	0.213±0.022	0.143±0.017	0.399±0.038
	CWl	0.988±0.005	$y = (0.175 - 0.277e^{-7.335x})e^{-1.067x} + 0.102$	0.102±0.009	0.155±0.097	0.250±0.025	0.287±0.178
	F	0.264ns		24.083 **	0.335ns	12.240 *	0.377ns
	LWh	0.973±0.009	$y = (0.108 - 0.153e^{-4.001x})e^{-0.362x} + 0.045$	0.053±0.007	0.688±0.143	0.121±0.003	1.270±0.265
20cm	CWh	0.981±0.007	$y = (0.119 - 0.328e^{-10.822x})e^{-0.487x} + 0.209$	0.210±0.008	0.409±0.070	0.304±0.006	0.716±0.120
	F	0.487ns		230.067 ***	3.066ns	816.839 ***	3.620ns
	LWm	0.990±0.001	$y = (0.129 - 0.249e^{-5.527x})e^{-0.85x} + 0.120$	0.119±0.011	0.465±0.013	0.202±0.001	0.817±0.012
	CWm	0.979±0.010	$y = (0.081 - 0.197e^{-8.055x})e^{-0.307x} + 0.116$	0.126±0.016	0.445±0.106	0.184±0.007	0.791±0.202
	F	0.773ns		0.086ns	0.020ns	3.644ns	0.010ns

所有数值表示均值±标准误, * $P < 0.01$ 水平极显著, ** $P < 0.001$ 水平极显著; ns 不显著

合的回归方程及参数进行分析整理,如表 3 所示。 y_h 表示方程的水平渐进线,也即对应土层的含水量随时间的稳定值; x_m 表示对应的土壤深度当含水量达到最大值时所用的时间; y_m 表示对应的深度所达到的土壤含水量最大值; x^* 表示土壤含水量经过极大值后由迅速下降转为逐渐稳定的时间点。

在每个处理中,随着土壤深度的增加,各深度回归方程的拟合优度逐渐降低,说明此模型主要可以应用于浅层土壤含水量预测。各处理回归方程的水平渐近线 y_h 随着深度的增加而增加,说明浅层土壤中的含水量消耗较快,一方面是由于地表的蒸发,另一方面由于樱桃番茄的根系主要分布在浅层,根系吸水较多。各处理极大值处时间 x_m 随着深度的增加逐渐增加说明浅层土壤含水量首先达到饱和,往下依次达到饱和与近饱和。极大值处土壤含水量 y_m 随着土壤深度的增加逐渐减小,说明深层的土壤由于上层植物根系截流吸水等原因不能达到最大值含水量(饱和含水量),只能达到极大值含水量。

CWh 与 LWh10cm、20cm, CWm 与 LWm10cm, CWl 与 LWl10cm 的 y_h 、 y_m 、 x_m 和 x^* 可以得出,壤土比黄绵土更加保水;壤土比黄绵土的水分入渗率大,即入渗更快;壤土比黄绵土更早的进入稳定保水阶段。

每个处理的 30、40cm 土壤深度由于土壤中水分变化不明显,水分不能充分的到达该深度,因此在此深度不能得到合适的回归方程。

2.2 空气温度、相对湿度及土壤温度变化

随机选取 2012 年 7 月 29 日 0:00—7 月 29 日 23:00 的空气温度、相对湿度和土壤温度进行研究,其日变化均呈现出类似正弦曲线波动。对原始数据进行回归方程拟合,将原始数据和拟合方程共同显示在图 3 中。其中,分别表示壤土高水、中水和低水处理中土壤温度的变化规律及黄绵土高水、中水和低水处理中土壤温度的变化规律,空气温度和相对湿度的变化规律。空气温度在 16:00 左右达到最大值,在 7:00 达到最小值,相对湿度在 16:00 达到最小值,在 7:00 达到最大值,可见空气温度和相对湿度成反相关关系。10cm 的土壤温度均在 16:00 左右达到最大值,20cm 在 18:00 左右达到最大值,30cm 在 22:00 左右达到最大值,40cm 在 2:00 左右达到最大值。同一深度,壤土的温度除了在高水和中水 10cm 处小于黄绵土外,其余均高于黄绵土的温度。随着土壤深度的增加,土壤到达最大温度具有明显的滞后性,从拟合方程参数 $\Phi(z)$ 也可以看出,随着深度的增加, $\Phi(z)$ 逐渐减小。

空气温度和相对湿度的相关性为 -0.908^{**} ,负相关且达到了极显著水平。

原始数据拟合的回归方程参数如表 4 所示, $TA(z)$ 为日平均温度; $A(z)$ 为温度变幅; $\Phi(z)$ 为相位; ω 为角频率, $\omega = 2\pi/T$,这里 $T = 24$ h; z 为土壤深度。

2.3 樱桃番茄产量及水分利用效率

从表 5 可以看出,单株总产量高水处理显著高于中水处理和低水处理,高水处理产量最多,中水处理次之,低水处理最少;单果均重高水和中水处理显著高于低水处理。黄绵土低水处理水分利用效率显著高于其他处理,黄绵土的水分利用效率均高于壤土,且越缺水的条件下,樱桃番茄的水分利用效用越高。

3 讨论

在土壤水分运移距离随时间变化规律的研究中,经典的方法是通过 Richard 方程建立滴灌条件下土壤水分运动模型^[12]。目前研究水温变化较多的是使用 Hydrus-1D 或 Hydrus-2D,一个可用来模拟地下滴灌土壤水流及溶质二维运动的有限元计算机模型。S. Kanzari 等^[20]用 Hydrus-1d 模型来研究水份运移和溶质迁移,指出其对灌溉、土壤及植物有很大的影响,并且反过来可以控制灌溉和施肥。白艳梅等^[21]通过实验室测定和田间实际测定,用 Richard 进行拟合,得到了比较好的拟合效果。本文中的水分运移模型在土壤浅层除了最大值点附近,其余观测值点均可以得到很好的拟合效果,随着深度的增加,回归方程的拟合优度逐渐降低,水分运移规律不明显,原因可能是深层的土壤水分活跃性差,或者受灌溉量的限制。由于土壤含水量受太阳辐射、大气温度、相对湿度、风速、植株生长大小、光合作用等的影响,此种方法虽不能彻底消除参数的不唯一性,但是它很自然的提供了一种方法,去接近真实的水分运移规律,可以相对容易的去估计土壤浅层的水分运移规律^[21]。

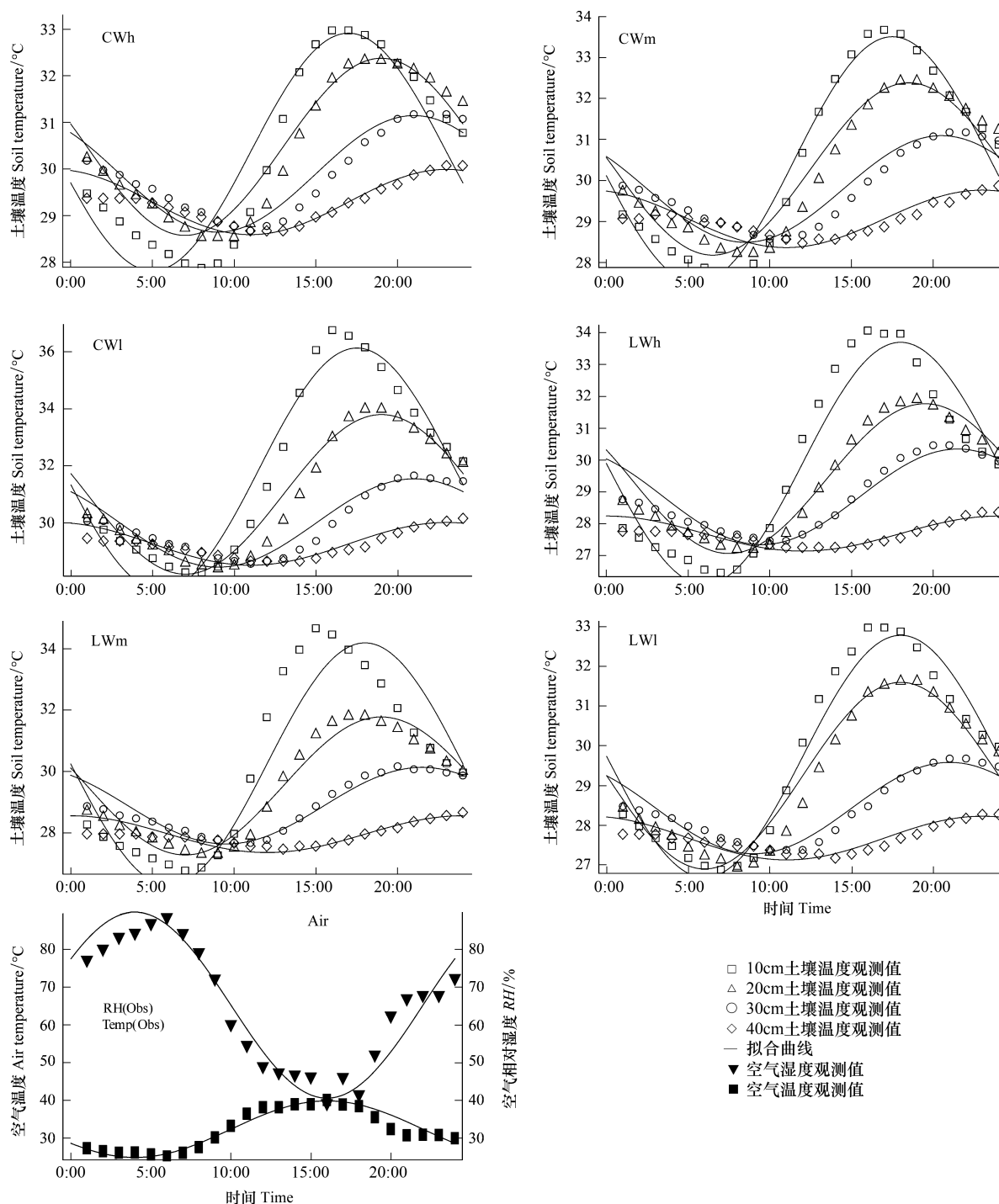


图3 2012年7月29日0:00—23:00的空气温度、相对湿度和土壤温度日变化规律

Fig.3 The daily variation of air temperature, relative humidity and soil temperature within 24 hour on July 29, 2012

土壤温度随着深度的增加具有滞后性,这是由土壤本身的物理性质决定的,高中低3个处理中土壤温度的滞后性表现为高水最为明显,中水次之,低水最弱,这是因为水的比热比较大,会大量吸收向土壤下层传递的热量,说明水分对于不同深度土壤温度的滞后性有重要影响。林兴军^[13]等研究表明,土壤温度和土壤水分作为两个相互作用的物理量,对作物的生长有强烈的影响。本文中低水处理同一深度土壤温度波动幅度较高水处理大,低水处理土壤含水量随着时间减小的同时,也出现了在纵坐标方向上的小幅上下波动,说明土壤温度对土壤含水量的变化有一定影响,如果土壤含水量和温度同步每小时测定一次,这个规律会更加明显。温

度的日变化图形在空气和土壤 10cm 处有一定的偏度,这是由于空气和土壤浅层的温度升温较快,而降温较慢,7:00 到 16:00 升温,而后直至第 2 天 7:00 左右一直降温,升温的时间小于降温的时间。

表 4 2012 年 7 月 29 日空气温度、相对湿度及土壤温度日变化拟合方程参数

Table 4 The daily variation fitting equation parameters of air temperature, relative humidity and soil temperature within 24 hour on July 29, 2012

处理 Treatment	土壤深度 z Soil depth/cm	土壤平均温度 $T_A(z)$ Mean soil temperature/℃	振幅 $A(z)$ Amplitude/℃	角频率 ω Angular frequency	初始相位 $\Phi(z)$ Initial phase
CWh	10	30.368	2.55	0.26	3.4034
	20	30.48	1.90	0.26	2.8798
	30	29.9	1.25	0.26	2.3562
	40	29.296	0.70	0.26	1.8326
CWm	10	30.508	3.00	0.26	3.2725
	20	30.284	2.10	0.26	3.0107
	30	29.796	1.30	0.26	2.4871
	40	29.068	0.70	0.26	1.8326
CWL	10	31.888	4.25	0.26	3.2725
	20	31.004	2.80	0.26	2.8798
	30	30	1.55	0.26	2.3562
	40	29.268	0.75	0.26	1.8326
LWh	10	29.9	3.80	0.26	3.1416
	20	29.424	2.35	0.26	2.7489
	30	28.852	1.50	0.26	2.2253
	40	27.7	0.55	0.26	1.5708
LWm	10	30.244	3.95	0.26	3.1416
	20	29.528	2.25	0.26	2.8798
	30	28.884	1.25	0.26	2.2253
	40	27.956	0.60	0.26	1.5708
LWL	10	29.732	3.05	0.26	3.1416
	20	29.248	2.35	0.26	3.1416
	30	28.432	1.15	0.26	2.3562
	40	27.676	0.55	0.26	1.8326
空气温度 Air Temp		32.40713	7.478333	0.26	3.6652
空气相对湿度 Air RH		65.2148	24.598	0.26	6.8068

表 5 樱桃番茄生长期产量及水分利用效率

Table 5 The fruit yield and water use efficiency in the Cherry tomatoes growth period

处理 Treatment	植株干重 Plant dry weight/g	单株总产量 Per plant yield/g	单果均重 Per fruit yield/g	总耗水量 Water consumption/L	水分利用效率 Water use efficiency/(g/L)
LWL	39.750 ±3.614bc	393.875±50.548b	7.549±0.962ab	19.765f	19.928±2.557a
LWm	55.000 ±8.109ab	489.625±25.178ab	10.432±1.154a	35.336d	13.856±0.713b
LWh	64.250 ±10.292a	666.125±107.692a	10.316±0.789a	53.859b	12.368±2.000bc
CWL	28.429 ±4.450c	183.857±23.748c	5.819±0.582b	24.517e	7.499±0.969c
CWm	35.143 ±5.002bc	347.143±51.848bc	11.107±2.215a	46.251c	7.506±1.121c
CWh	53.286 ±6.879ab	515.143±77.598ab	11.147±0.837a	62.000a	8.309±1.252c
F	3.827 ***	6.437 ***	3.306 *	2.006 ***	9.128 ***

所有数值表示均值±标准误,对每个处理,同列数据后不同小写字母分别表示邓肯多重比较法在 5%水平上差异显著, * $P<0.05$ 水平显著, *** $P<0.001$ 水平极显著

黄绵土中樱桃番茄的水分利用效率大于壤土。黄绵土中的樱桃番茄生物量和果实产量均高于对应处理

的塬土,说明黄绵土中的樱桃番茄将更多的水分用在了生物量和果实的产出上,地上部分耗水多于塬土,因此地下部分相对水分损耗较多,土壤剩余含水量较少,土壤中黄绵土的含水量低于塬土。

4 结论

(1)塬土在不同深度的平均容积含水量均高于黄绵土,说明塬土更保水;塬土比黄绵土先达到极大值容积含水量,其入渗速率高于黄绵土。黄绵土种樱桃番茄水分利用效率更高。

(2)本文所得不同深度的水分运移方程对于春夏季黄土高原地区樱桃番茄灌水有一定的指导意义。在拟合方程的变量范围内,根据时间可以较准确的确定樱桃番茄盛果期土壤表层含水量。土壤水分对不同深度土壤温度的效应有显著滞后性。

参考文献 (References):

- [1] Shangguan Z P, Shao M A, Horton R, Lei T W, Qin L, Ma J Q. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. *Agricultural Water Management*, 2002, 52(2): 139-154.
- [2] 李俊, 李建明, 曹凯, 赵志华, 张大龙, 徐菲, 杜宏斌, 蒋学琴. 西北地区设施农业研究现状及存在的问题. *中国蔬菜*, 2013, (6): 24-29.
- [3] 罗安荣. 温室樱桃番茄产量品质及水分生产函数[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- [4] 霍国琴, 巨海林, 王周平, 张伟兵, 雷丽. 陕西省鲜食番茄栽培现状及主栽品种选择. *中国蔬菜*, 2012, (9): 12-15.
- [5] Gao L, Shao M A. Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 41-54.
- [6] Fan J, Shao M A, Wang Q J, Scott B. J, Klaus R, Cheng X R, Fu X L. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid loess plateau. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 93-100.
- [7] 曹永慧, 周本智, 陈双林, 萧江华, 王小明. 不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应. *生态学报*, 2012, 32(23): 7421-7429.
- [8] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. *水科学进展*, 2012, 23(3): 310-316.
- [9] 吴燕. 灌溉方式对日光温室樱桃番茄生理特性及产量品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009.
- [10] 刘祖贵, 段爱旺, 吴海卿, 张寄阳, 王广兴. 水肥调配施用对温室滴灌番茄产量及水分利用效率的影响. *中国农村水利水电*, 2003, (1): 10-12.
- [11] Panigrahi B, Panda S N, Raghuwanshi N S. Potato water use and yield under furrow irrigation. *Irrigation Science*, 2001, 20(4): 155-163.
- [12] 邵明安, 王全久, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 55-181.
- [13] Lin X J, Liang Y L, Wei Z X. Hysteresis of soil temperature under different soil moisture and fertilizer in solar greenhouse conditions. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(63): 13729-13734.
- [14] 任杰, 沈振中, 赵坚, 杨杰. 低温水入渗条件下土壤水分温度动态变化. *水科学进展*, 2013, 24(1): 125-131.
- [15] Ruidisch M, Kettering J, Arnhold S, Huwe B. Modeling water flow in a plastic mulched ridge cultivation system on hillslopes affected by South Korean summer monsoon. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 204-217.
- [16] Ma D H, Shao M A, Zhang J B, Wang Q J. Validation of an analytical method for determining soil hydraulic properties of stony soils using experimental data. *Geoderma*, 2010, 159(3/4): 262-269.
- [17] Fu W, Huang M B, Gallichand J, Shao M A. Optimization of plant coverage in relation to water balance in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2012, 173-174: 134-144.
- [18] 冯绍元, 丁跃元, 曾向辉. 温室滴灌线源土壤水分运动数值模拟. *水利学报*, 2001, (2): 59-62.
- [19] 袁志发, 宋世德. 多元统计分析(第二版). 北京: 科学出版社, 2009: 104-115.
- [20] Kanzari S, Hachicha M, Bouhlila R, Battle-Sales J. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (Bou Hajla, Kairouan) -Salinization risk of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 86: 34-42.
- [21] Bai Y M, Inosako K, Liang Y L, Inoue M, Yamada S, Takuma K. Practical estimation method for soil hydraulic properties based on observed data in short-term experiments conducted in a foreign field. *Sand Dune Research*, 2008, 55(2): 71-84.