

# 微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响

张子卓<sup>1</sup>, 张珂萌<sup>1</sup>, 牛文全<sup>2,3</sup>, 薛万来<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为探明微润灌溉对番茄生长和土壤水分的影响, 设置了3种不同埋深和2种不同工作压力, 研究了微润带埋设深度和压力对番茄生长、产量及水分利用效率的影响。结果表明: 定植后94天, 微润带压力水头为180 cm、埋深为15 cm时的番茄株高分别比埋深10 cm和20 cm的处理增加9.17%和7.55%; 此时番茄气孔导度最小, 光合速率和水分利用效率最大, 分别比埋深为10 cm和20 cm的处理增产3.24%和7.45%; 不同埋深土壤含水率垂直分布随时间的变化存在差异, 15 cm埋深时的土壤含水率最大。微润带埋深是影响土壤水分时空变化的主要因素; 压力对土壤含水量时间变化影响不显著。

**关键词:** 微润灌溉; 埋深; 压力水头; 番茄生长状况; 土壤水分动态

中图分类号: S275.4 文献标志码: A

## Effects of burying depth on growth of tomato and soil moisture dynamics by moistube-irrigation in green house

ZHANG Zi-zhuo<sup>1</sup>, ZHANG Ke-meng<sup>1</sup>, NIU Wen-quan<sup>2,3</sup>, XUE Wan-lai<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to verify the effects of moistube-irrigation on the growth of tomato and water condition of soil, three different buried depths and two different pressure heads were designed. In addition, the resulting the effects were further analyzed on the growth and yield of tomato and water use efficiency. The results showed that after 94 days of planting, the buried depth at 15 cm had the highest plants which were increased by 9.17% and 7.55% from the buried depths at 10 cm and 20 cm, respectively. At this time, tomatoes had the minimal stomata conductance and highest photosynthetic rate and WUE within all of the four treatments employed in this investigation, resulting in yield increases of 3.24% and 7.45% more at buried depth at 15cm than those at buried depths at 10 cm and 20 cm, respectively. The temporal variations of soil water content along vertical distribution were different under different buried depths, with the buried depth at 15 cm the highest. The buried depth of moistube was the main factor influencing the temporal variations of soil water content. However, the effects of temporal variations of soil water content under different pressures were secondary.

**Keywords:** Moistube-irrigation; burying depth; working pressure; growth characteristics of tomato; soil moisture dynamics

微润灌通过管壁上微孔向外呈发汗状渗水灌溉, 属于连续性灌溉<sup>[1]</sup>。该技术在无外加动力情况下, 可实现自动供水灌溉。与其他灌溉技术相比, 该

灌溉方式可保证作物根区土壤具有良好的通透性, 棵间无效蒸发量小, 具有节水效果明显、运行成本低、抗堵塞性能强等优点, 适宜旱区作物的用水需

收稿日期: 2014-05-31

基金项目: 国家高技术发展计划(863计划)课题(2011AA100507)

作者简介: 张子卓(1987—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉。E-mail: xiaohaizizzz655@163.com。

通信作者: 牛文全(1972—), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水土资源高效利用与节水灌溉理论研究。E-mail: nwq@vip.sina.com。

求<sup>[2-3]</sup> 具有广阔的应用前景。众多学者已经对温室中不同灌溉处理对蔬菜生长和产量的影响等方面进行了大量研究<sup>[4-14]</sup>: 不同供水压力和管带埋深对温室番茄根区土壤水分、生理特征、产量和水分利用率影响不同<sup>[15-16]</sup>; 番茄生育期耗水量是研究番茄生长特性的一个重要因素, 不同生育阶段番茄的耗水量不同, 一般呈现出开花结果期与结果盛期比较大, 苗期与结果末期比较小的规律<sup>[17-19]</sup>。研究发现, 不同灌溉方法番茄株高、茎粗随时间的变化趋势均呈“S”型曲线<sup>[20-21]</sup> 土壤水分含量对作物根系吸水有重要影响, 土壤水分调控的不同可局部改变根系生长分布, 土壤水分过高或过低都不利于番茄增产, 同时也不利于水分利用效率的提高<sup>[22-23]</sup>。关于供水条件对作物根系发育的影响亦有大量研究<sup>[24-27]</sup>, 但相关研究多见于滴灌领域, 范凤翠等<sup>[28]</sup> 研究结果表明日光温室番茄主要根系层为 0~40 cm, 最深根层为 60 cm; 陈新明等通过无压地下灌溉试验认为番茄不同生育期的根系密集层、根系体积和最长根变化受供水压力和灌水器埋深深度的影响<sup>[29]</sup>; 张俊等<sup>[30]</sup> 室内土箱模拟实验得出土壤初始含水率对微润灌溉土壤水分扩散有很大影响, 湿润锋推进速率与初始含水率呈正相关关系; 于秀琴等<sup>[31]</sup> 通过不同灌溉方式的对比试验发现微润灌溉更有利于黄瓜植株生长, 并显著降低了黄瓜日耗水量、有利于产量形成和提高水分利用效率; 何玉琴等<sup>[1]</sup> 研究了微润灌溉条件下不同埋设深度、间距和压力对玉米生长及产量的影响, 结果表明玉米茎粗、株高和产量随耗水量的增加而增加, 微润带的埋设深度、间距和压力对玉米的产量和水分利用效率都有显著的影响。

关于微润灌溉研究目前大多还集中在室内模拟研究阶段, 田间试验研究相对较少。本试验以温室番茄为研究对象, 分析不同埋设深度和压力水头对温室番茄的生长、耗水及产量的影响, 提出微润灌溉最优的埋设深度和压力组合模式, 为微润灌溉的应用和推广提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本情况

本试验于 2013 年 4 月—7 月在陕西杨凌温室内进行。温室结构为房脊型, 长 8 m, 宽 3.5 m, 高 3.8 m。杨凌位于东经 108°04′, 北纬 34°20′, 所处地理位置属暖温带季风半湿润气候区, 年均日照时数 2 163.8 h, 无霜期 210 d, 试验土壤为瘠土, 其中粒径 0.050~1.000 mm 的砂粒占 27%, 粒径 0.050~

0.005 mm 的粉砂颗粒占 32%, 粒径 ≤0.005 mm 的黏粒占 41.7%。60 cm 土层内土壤平均容重为 1.37 g·cm<sup>-3</sup>, 田间持水量为 25% (质量含水率), 饱和含水率为 51.7%。种植前测得土壤养分状况: 有机质含量为 16.11 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮含量为 1.85 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷含量为 1.21 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾含量为 20.13 g·kg<sup>-1</sup>, 土壤肥力中等, 土壤初始含水率为 13%。

### 1.2 试验材料与设计

供试番茄品种为荷兰普罗旺斯, 属中晚熟品种。定植时间为 2013 年 4 月 25 日, 试验结束时间为 2013 年 7 月 20 日, 起垄种植, 垄宽 50 cm, 高 15 cm, 长 3.6 m, 垄顶为平顶, 垄间距 40 cm, 株距 35 cm, 行距 40 cm, 每行种植 10 棵, 微润带置于垄中心两行作物中心, 不铺设地膜。

4 月 25 日—7 月 20 日期间温室内最高温度为 38℃, 最低温度为 12.5℃, 生育期内平均温度为 22℃。本试验将番茄全生育期划分为苗期、开花结果期、结果盛期、结果后期 4 个阶段。室内土箱模拟实验研究结果表明<sup>[32]</sup> 在 0.2~2.0 m 水头范围内, 微润带流量与压力水头近乎呈线性关系, 适宜的埋深为 15~20 cm。综合考虑番茄生长的需水特性, 本试验埋深设置了 3 个水平, 分别为 10 cm、15 cm 和 20 cm; 压力水头设置了 140 cm 和 180 cm 两个水平(根据前期研究结果, 在压力水头介于 120~200 cm 时, 微润带流量变化非常小, 因此本试验设置了一个埋深为 15 cm, 压力水头为 140 cm 的处理进行对比分析), 采用非完全组合实验设计, 试验共重复 3 次, 见表 1 (其中总灌溉量为实际灌水量)。试验供水装置为马氏瓶, 每两行埋设一条微润带(深圳市微润灌溉技术有限公司生产)。

微润带长度为 400 cm, 进口端连接供水系统, 出口端封闭, 试验微润带与马氏瓶由橡皮软管连接。整个生育期(从番茄定植到拉秧)连续灌水, 为防止各小区间水分相互渗透, 相邻小区间用埋深为 60 cm 的塑料布隔开。

表 1 试验设计

Table 1 Test design

处理 Treatment	埋深 Burying depth /cm	压力水头 Pressure /cm	总灌水量 Irrigation water /mm
T1	20	180	210.88
T2	15	140	211.84
T3	15	180	224.37
T4	10	180	270.24

### 1.3 数据测试方法

1.3.1 土壤含水率 采用烘干法测定土壤含水率,在距微润带水平距离为 5 cm 处取土,取样深度分别为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 和 50~60 cm,每隔 11 天采样 1 次。

1.3.2 番茄生长状况 定植后 17 天开始测定番茄生长状况,每隔 11 天测定一次株高、茎粗等指标,每个处理任意选取 4 株样本测量,并取平均值。株高采用米尺从番茄基部开始量取;茎粗采用游标卡尺测量基部第二伸长节间中部最大的直径和最小的直径,取平均数,即:茎粗 = (最长直径 + 最短直径) / 2。在番茄定植后的第 20 天,采用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(美国 LI-COR 公司生产)在 4 个处理中选取相同位置两株植株的两片最大叶片测定其光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ ),并求平均值。

1.3.3 番茄产量的测定 番茄生育末期(定植 94 天)番茄 2 穗果时,不掐尖并且选取每个处理中间部位的 4 株番茄测定果实产量,采用电子称测量。

1.3.4 数据处理 实验数据采用 Excel 2007 作图 DPS 软件中的 Duncan 多重比较法比较数据的差异性,各图表中的数据均为平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 埋深和工作压力对番茄生长的影响

2.1.1 对番茄株高的影响 方差分析显示不同埋深处理对番茄株高具有极显著影响( $P < 0.01$ ),不同处理番茄株高随定植后天数的变化趋势见图 1。

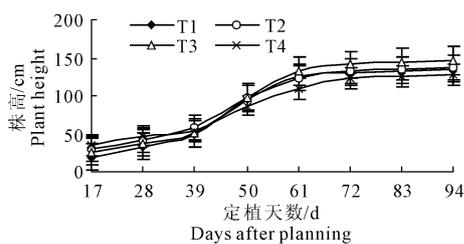


图 1 不同微润带埋深及工作压力对番茄株高的影响  
Fig. 1 Effects of different burying depths and pressures on tomato plant heights

从图 1 可以看出,番茄株高均随定植后生长时间增加呈“S”型增长趋势,定植后 39 天至 61 天之间,番茄株高增长速度最大,其他时段内,番茄株高增长速度较缓慢。定植后 39 天内,番茄的株高随着微润带埋深的增加而减小,埋深为 10 cm 的 T4 处理的平均株高最大,比埋深为 15 cm 和 20 cm 的 T2、T3、T1 处理分别提高了 5.66%、18.00%、34.95%。

分析原因,主要是定植初期,番茄根系较小,主要分布在浅层土壤,微润带埋深较浅时水分直接供根系吸收。而埋深较大时,水分需向上扩散渗透到根区土壤才可被吸收利用,根系吸水出现一定滞后。

对生长 39 天后株高观测发现,工作压力相同时,埋深过大或者过小,都不适宜番茄株高的增长。埋深最小的 T4 处理(10 cm)后期株高最小,埋深最大的 T1 处理次之,埋深为 15 cm 的 T3 处理最大。此阶段番茄需水量显著增大,压力对番茄株高的影响也增强。因此,相同埋深的 T2、T3 处理,由于 T3 处理的工作压力最大,其株高也最大。整个生育期内 T3 处理的平均株高比 T1、T2 和 T4 处理分别高 7.55%、2.64% 和 9.17%。而埋深为 10 cm 时,虽然前期能较好地满足番茄生长,但该处理的地表无效蒸发大,水分利用效率低。当埋深为 20 cm 时,部分水分渗漏到番茄主要根系分布土层下,影响番茄根系对水分的吸收。由此可见,微润带埋深为 15 cm 左右、压力水头为 180 cm 时最有利于番茄生长,该结果与牛文全<sup>[32]</sup>室内土箱模拟实验得出埋深为 15 cm 最适合作物根系生长的结论及陈鹏等<sup>[34]</sup>滴灌埋深结论基本一致。

2.1.2 对番茄茎粗的影响 不同处理番茄茎粗随定植后天数的变化趋势见图 2。

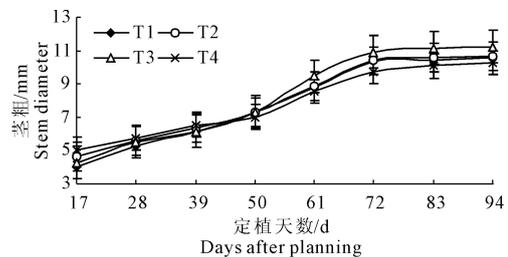


图 2 不同微润带埋深及工作压力对番茄茎粗的影响  
Fig. 2 Effects of burying depths and pressures on tomato stem diameters

从图 2 可以看出,埋深和压力对番茄茎粗的影响基本与株高类似,随着定植天数的增加茎粗也呈现“S”型变化趋势,但方差分析结果显示,埋深处理对番茄的茎粗影响不显著( $P > 0.05$ )。在番茄生长前期因根系较浅,植株总耗水较小,埋深较小的处理有利于该阶段番茄茎粗的增长,而该阶段压力影响较小。在番茄生长后期,埋深和压力均对茎粗影响增强,埋深为 15 cm,压力为 180 cm 水头的 T3 处理茎粗最大。

仅从番茄株高和茎粗生长情况而言,埋深 15 cm,压力水头 180 cm 是最优的处理,适当增大微润灌的工作压力,可促进番茄快速生长。

## 2.2 埋深和工作压力对番茄光合及蒸腾的影响

在番茄苗期,定植 20 天时,取样测定,测试结果

如图 3 所示。

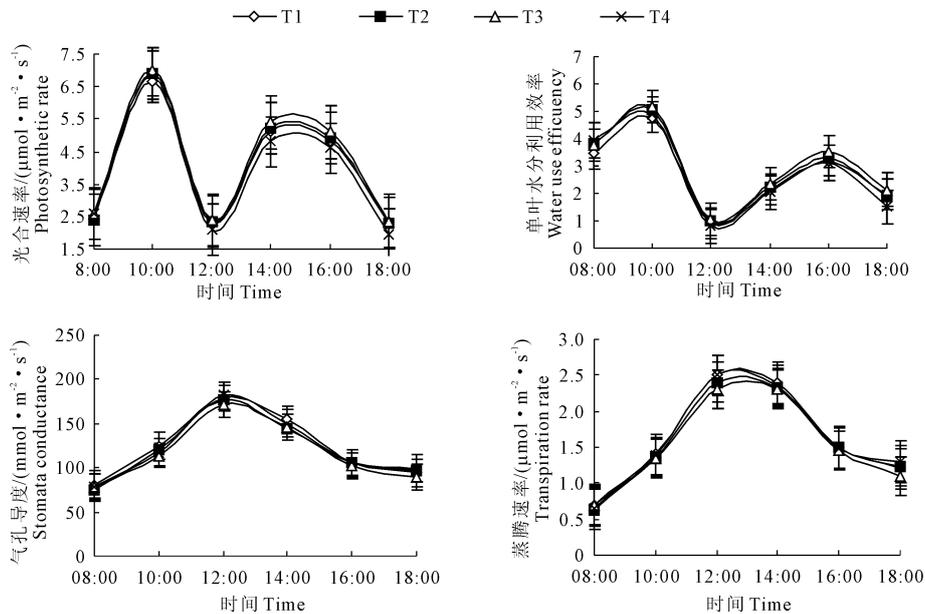


图 3 埋深和压力对苗期番茄光合速率、单叶水分利用效率、气孔导度和蒸腾速率的影响

Fig. 3 Variations of photosynthesis rates, transpiration rates, stomata conductance and leaf water use efficiencies with different burying depths and pressures

用方差分析法对不同处理番茄光合速率、单叶水分利用效率、气孔导度和蒸腾速率进行显著性分析( $0.01 < P = 0.0159 < 0.05$ ),说明埋深和压力对番茄光合和蒸腾速率有显著影响。由图 3 可知,4 种处理下叶片光合速率日变化总体趋势呈近似双峰曲线,两个波峰分别出现在 10:00 和 14:00 附近。T3 的峰值最高,比 T1、T2 和 T4 的峰值分别高 4.79%、1.45% 和 2.94%。番茄叶片的蒸腾速率和气孔导度日变化规律相似,呈单峰曲线,蒸腾速率和气孔导度大小顺序为  $T1 > T4 > T2 > T3$ ,即微润带埋深处理:20 cm > 10 cm > 15 cm。番茄蒸腾速率的峰值出现在 13:00,气孔导度的峰值出现在 12:00。原因是随光照强度增加,气孔张开,蒸腾速率增加,12:00 时达到峰值。番茄蒸腾速率的变化具有一定的滞后性,故其峰值出现在 13:00。植株为维持体内水分平衡,为减少蒸腾失水而关闭气孔。8:00 时叶片水分利用效率为  $T4 > T2 > T3 > T1$  处理;10:00~13:00 左右差异不明显,13:00~18:00 左右  $T3 > T2 > T1 > T4$  处理。T3 的日平均水分利用效率最高,分别比 T1、T2、T4 处理高 9.65%、4.46%、10.17%。4 个处理的单叶水分利用效率的差异不明显,影响不显著,总体上 T3 处理最优,说明埋深为 15 cm,压力为 180 cm 的处理能够提高番茄水分利用效率,具有良好的节水效果。

## 2.3 对番茄耗水规律的影响

各处理不同生育阶段耗水规律见表 2。从表 2 中可以看出,整个生育期各处理日均耗水量差异较大,在统计上各处理灌水量、阶段耗水量、阶段耗水强度差异达显著水平,土壤水变化量差异不显著,T4 处理各阶段耗水量最多。结果盛期是番茄产量形成和耗水量最多的关键时期,该阶段 T1、T2、T3 和 T4 处理日耗水量分别达  $3.27$ 、 $3.27$ 、 $3.38$   $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $3.97$   $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从整个生育期来看,T4 处理的番茄日均耗水量远大于其他三个处理,分别比 T1、T2 和 T3 处理高 30.21%、29.84% 和 21.06%;T1、T2、T3 和 T4 处理全生育期耗水量分别为 209.2、210.3、222.9 mm 和 268.8 mm。T1、T2、T3 处理总耗水量低于 T4 处理,较 T4 处理节水,这可能是由于埋深为 10 cm 的 T4 处理微润带地表无效蒸发增大而引起水分利用效率降低。

## 2.4 对番茄水分利用效率(WUE)及产量的影响

表 3 是不同处理的番茄产量和水分利用效率,从表 3 可知,在番茄的整个生育期内,耗水量随着灌水量减少而减少,T1—T3 处理产量随着耗水量增加而增加,方差分析结果显示各处理间产量、灌水量和水分利用效率差异为极显著性水平( $P < 0.01$ ),各处理间 T1、T4 处理的水分利用效率差异性显著,T2 和 T3 间水分利用效率差异不明显。

表 2 同处理下番茄各生育阶段耗水规律

Table 2 Water consumption of tomato at different stages with different treatments

试验处理 Treatment	苗期(4月25日-5月19日) Seedling stage( April 25 - May 19)				开花结果期(5月20日-6月16日) Rewarding( May 20 - June 16)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
T1	20.55bB	3.05abA	23.60cB	0.85cB	35.00bB	-1.80abA	33.20cB	1.34cB
T2	20.26bB	3.04abA	23.30bcB	0.93bcB	38.00bB	-2.00abA	36.00bcB	1.50bcB
T3	22.77bB	3.53aA	26.30bB	1.14bAB	40.00bB	-2.80aA	37.20bB	1.68bAB
T4	31.50aA	3.10bA	34.60aA	1.50aA	48.84aA	-1.84bA	47.00aA	1.96aA

试验处理 Treatment	结果盛期(6月17日-7月20日) Results the height ( June 17 - July 20)				结果末期(7月21日-8月10日) Results the end ( July 21 - August 10)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
T1	120.23bB	0.77abA	121.00cB	3.14cB	35.10bB	-3.70abA	31.40cB	1.40cB
T2	119.98bB	1.02abA	121.00bcB	3.32bcB	33.60bB	-3.60abA	30.00bcB	1.50bcB
T3	124.00bB	1.00aA	125.00bB	3.44bAB	37.60bB	-3.20aA	34.40bB	1.80bAB
T4	146.00aA	1.00bA	147.00aA	3.97aA	43.90aA	-3.70bA	40.20aA	2.00aA

注: 1. 表中 A—阶段灌水量(mm), B—土壤水变化量(mm), C—阶段耗水量(mm), D—阶段耗水强度( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) ( $B = A - C, D = C/t$ )。2. a b c 分别表示  $P=0.05$  水平下的显著性差异; A B C 分别表示  $P=0.01$  水平下的显著性差异。

Note: 1. A—Stage of irrigation water(mm), B—Soil water variation(mm), C—Stage water consumption(mm), D—Stage water consumption intensity( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。2. a b c showed significant differences in DSL ( $P=0.05$ ); A B C showed significant differences in DSL ( $P=0.01$ ), and hereinafter.

表 3 不同处理对番茄产量和水分利用效率的影响

Table 3 Effects on tomato yields and water use efficiencies with different treatments

处理 Treatment	产量 Yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	灌水量 Irrigation water /mm	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 Water use efficiency /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
T1	93039.45d	210.88c	209.2b	444.74b
T2	94175.18c	211.84c	210.3b	447.81a
T3	99974.26a	224.37b	222.9b	448.52a
T4	96832.63b	270.24a	268.8a	360.24c

其中, T3 的 WUE 最大, 达到了  $448.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 约是 T1 处理的 1.008 倍、T2 和 T4 处理的 1.002 倍和 1.245 倍。T3 处理番茄的产量最高, 折算产量为  $99974.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 分别较 T1、T2 和 T4 处理增产 7.45%、6.16% 和 3.24%。T4 处理埋设深度小, 且压力大, 因此流量大, 地表无效蒸发大, 水分利用率降低, 导致该处理耗水量最大; T1 处理埋设深度大, 向深层渗透量较大, 该部分水分可能无法被番茄有效利用, 因此该处理番茄产量和水分利用率较低, 各处理间水分利用效率的变化规律与单叶水分利用效率变化规律相似。从表 3 还可以看出, 产量和水分利用效率的变化趋势与株高、茎粗和光合蒸腾速率的变化趋势基本一致, 产量和水分利用效率均是 T3 处理最大, 说明埋深 15

cm, 压力水头 180 cm 时的处理最适宜番茄生长, 有利产量的形成, 具有节水的优势。

## 2.5 埋深和工作压力对土壤水分动态的影响

### 2.5.1 埋深对土壤水分动态的影响

本试验于日光温室内进行, 不受降雨影响, 地下水位在 85 m 以下, 且微润带是地理的方式, 可忽略地下水补给和地表无效蒸发, 认为土壤水分变化仅受灌水量、植物根系对土壤水分的吸收两因素影响。温室内 60 cm 以下土层为未熟化的土壤, 植物根系难以下扎, 本试验番茄根系主要分布在 0~60 cm。对 T1、T3、T4 处理 (压力水头均为 180 cm, 埋深依次为: 20 cm, 15 cm, 10 cm) 番茄不同生育期 0~60 cm 深度土壤水分进行分析, 各处理以微润带为中心点, 水平两侧相同距离土壤含水率基本对称见图 4 (图中只出现一侧)。

由图 4 可知, 不同埋深下土壤含水率随时间变化差异较大。在 0~10 cm 土层范围内, 6 月 3 日之前, 20 cm 和 15 cm 埋深的土壤含水率持续减小, 10 cm 埋深的土壤含水率持续增大; 从时间来看, 5 月 23 日之前, 10 cm 埋深的土壤含水率低于其他两个埋深, 说明此段时间内番茄根系吸收水分导致土壤含水率降低, 由此可知 5 月 23 日之前番茄的主要根系活动层分布在土壤表层以下 10 cm 左右, 并且番茄生育前期根系吸收水分较少, 因此, 整个生育期来看, 此段时间内 10 cm 埋深的土壤含水率远大于 20 cm 和 15 cm 埋深, 20 cm 埋深的土壤含水率最低。

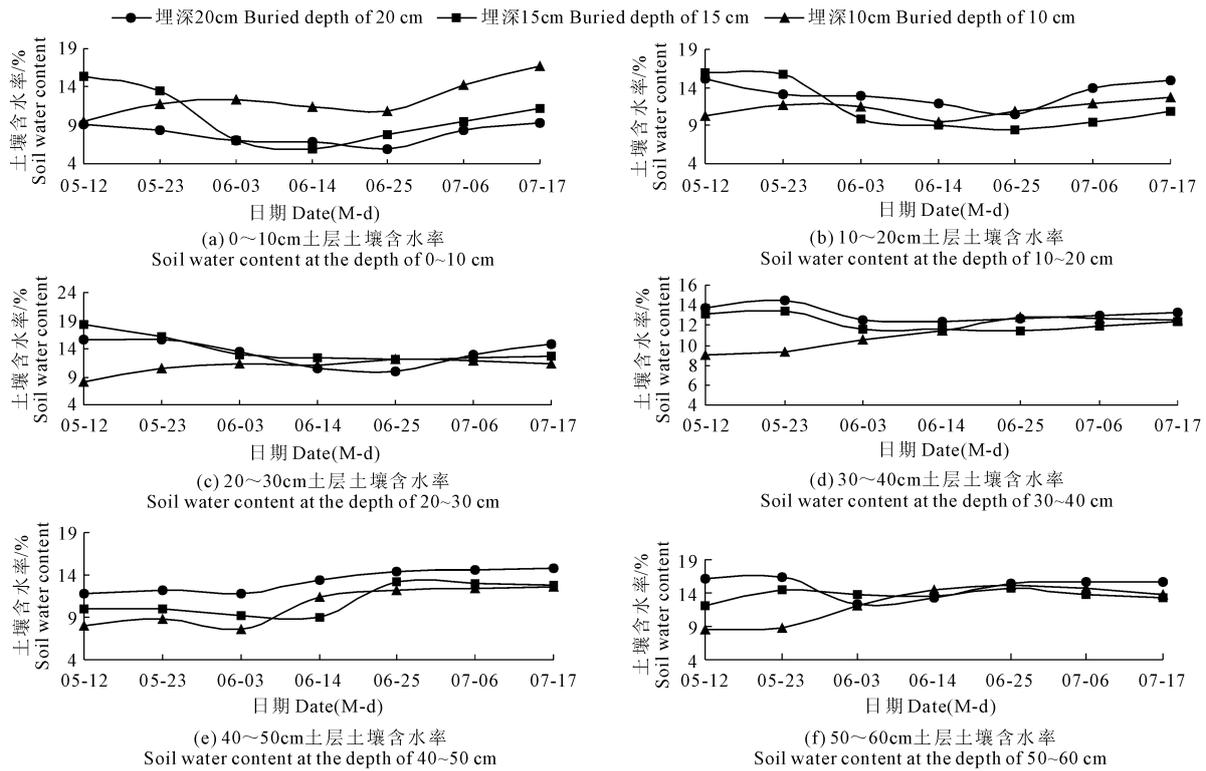


图 4 微润带埋深对 0~60 cm 土层深度土壤水分动态变化的影响

Fig. 4 Temporal variations of soil water content under different burying depths between 0 and 60 cm

在 10~30 cm 土层范围内, 整个生育期来看, 10 cm 埋深的土壤含水率低于其他两个埋深。5 月 23 日—7 月 6 日期间, 埋深 15 cm 和埋深 20 cm 的土壤含水率先后出现锐减, 并低于其他埋深的土壤含水率。随着番茄根系不断向下生长, 15~20 cm 土层内分布大量的番茄根系, 吸收土壤水分, 影响土壤水分变化。

在 30~60 cm 土层范围内, 三个埋深的土壤含水率变化趋势大致相同, 到后期(6 月 25 日—7 月 16 日) 基本趋于平稳, 由此可知番茄根系吸收水分主要在 0~30 cm 土层范围内进行, 说明微润带埋深和番茄根系吸收水分影响土壤水分在垂直方向上的分布。

经计算, 埋深为 20 cm、15 cm 和 10 cm 的处理日平均土壤含水率峰值分别为 12.22%、12.44% 和 11.12%。番茄整个生育期平均含水率最大值出现在埋深 15 cm 埋深 20 cm 次之。

通过以上分析可知, 不同埋深土壤含水率垂直分布随时间的变化存在差异, 15 cm 埋深时的土壤含水率最大, 说明微润带埋入过深会导致水分深层渗漏, 过浅会增加地面蒸发, 本次试验中, 微润带埋深为 15 cm 时更有利于番茄根系吸收水分。

2.5.2 工作压力对土壤水分动态的影响 为探求

压力水头对土壤含水量的影响, 由于工作压力对微润带流量的影响不大, 取 T2 和 T3 两个处理(压力水头分别为: 140 cm、180 cm; 埋深均为 15 cm) 30~40 cm 的土壤含水率动态变化来分析, 见图 5。

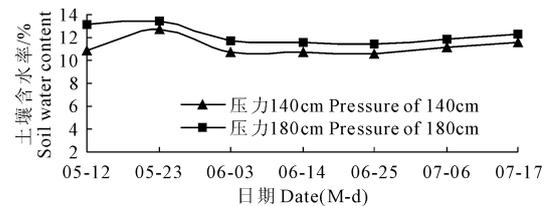


图 5 压力对 30~40 cm 土层土壤水分动态变化的影响

Fig. 5 Temporal variations of soil water content under different pressures at the depth of 30~40 cm

由图 5 可知, 两个压力的变化趋势基本一致, 均遵循先增大后减小再增大的变化规律, 但方差分析结果表明压力水头对土壤水分动态变化的影响不显著 ( $P = 0.842 > 0.05$ )。

3 讨论

已有研究表明, 埋设深度和压力是影响土壤水分分布的主要因素, 牛文全等通过室内土箱模拟试验, 发现压力水头和土壤压力势是微润灌流量的驱动因子, 并且微润带最适埋深为应为 15~20 cm 之

间<sup>[32]</sup>。本实验中不同埋深和压力水头处理对番茄生长具有较大的影响,埋深过浅会导致地表无效蒸发增大,水分利用效率降低;埋入较深会导致水分深层渗漏影响湿润体的形状与位置,影响作物根系的分布和水分吸收,本实验中微润带埋深为 15 cm 时最有利于番茄生长。

土壤含水率是农业生产中一重要参数,不同埋深和工作压力下土壤水分动态变化规律不同。薛万来等<sup>[34]</sup>室内土箱模拟实验研究认为土壤含水率最大值均出现在微润带附近,并向管带四周逐渐减小,同一水平位置,压力水头越大,土壤水分分布范围越广,土壤平均含水率越高;本次试验中,微润带埋深为 15 cm 时更有利于番茄根系水分的吸收,但不同压力时各土层的土壤含水率变化规律与薛万来的室内土箱模拟实验略有不同,不同压力的土壤最大含水率未出现在管带附近,而是出现在管带以下 5 ~ 10 cm 处,可能与作物的根系吸收有关。本文只选取了两个工作压力,尚需设置多个工作压力来对比得出作物最适宜的工作压力。

土壤水分通过影响叶片气孔变化、保卫细胞的运动和叶肉细胞的一系列生化行为,来调节气孔开张度。由于气孔是植物体内外气体交换和水分交换的重要通道,气孔的开闭自然会影响到蒸腾作用和光合作用。当蒸腾速率下降大于光合速率时,就可以提高单叶片的 WUE。本研究中可以看出,4 个处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度及单叶水分利用效率日变化呈相似趋势,埋深为 15 cm 的处理提高了番茄水分利用效率,具有良好的节水效果。

本试验结果与王燕<sup>[15]</sup>无压地下灌溉试验结果基本一致,但与于秀琴<sup>[33]</sup>微润灌黄瓜的耗水规律有所不同,主要是由于黄瓜和番茄根系分布深度不同,不同生育阶段的需水量差异也较大,番茄结果盛期日均耗水量最大,而黄瓜成熟末期耗水量最大。

## 4 结 论

微润带埋深对番茄生长具有很大的影响,对番茄株高影响极显著,对番茄茎粗影响不显著,埋深为 15 cm,压力水头为 180 cm 时最有利于番茄生长。

微润灌番茄叶片光合速率日变化呈双峰曲线,微润带埋深对单叶水分利用效率影响不显著,对产量、灌水量和水分利用效率影响极显著,当埋深为 15 cm 时,番茄产量和水分利用效率最大。

微润带埋深对番茄整个生育期土壤含水率分布有较大的影响,平均含水率最大值出现在埋深 15 cm 的处理,压力对土壤水分的影响不显著。

## 参 考 文 献:

- [1] 何玉琴,成自勇,张 芮,等.不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J].华南农业大学学报,2012,33(4):567-569.
- [2] Koumanov K S, Hopmans J W, Schwankl L W. Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation[J]. Irrigation Science, 2006, 24(4): 267-278.
- [3] Gölcü M, Pancar Y Y. Sekmen energy saving in a deep well pump with splitter blade[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(5): 638-651.
- [4] 张国红,袁丽萍,郭英华,等.不同施肥水平对日光温室番茄生长发育的影响[J].农业工程学报,2005,21(12):151-154.
- [5] 杨文斌,郝仲勇,王凤新,等.不同灌水下限对温室茼蒿生长和产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):94-98.
- [6] 李晶晶,王铁良,李 波,等.不同灌溉方式对日光温室青椒生长及产量的影响[J].灌溉排水学报,2008,28(1):110-112.
- [7] 李毅杰,原保忠,别之龙,等.不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J].农业工程学报,2012,28(6):123-138.
- [8] Kirda C, Cetin M, Dusqan Y, et al. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69: 191-201.
- [9] 陈新明,蔡焕杰,王 健.作物根区无压地下灌溉技术灌水指标研究[J].灌溉排水学报,2005,24(2):5-9.
- [10] 康绍忠,蔡焕杰.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [11] 胡笑涛,康绍忠,张建华,等.番茄垂向分根区交替控制滴灌室内试验与节水机理[J].农业工程学报,2005,21(7):1-5.
- [12] 王 舒,李光永,孟国霞,等.日光温室滴灌条件下滴头流量和间距对黄瓜生长的影响[J].农业工程学报,2005,21(10):167-170.
- [13] 单志杰,蔡焕杰,陈新明,等.无压灌溉埋管深度的机理性研究及大田试验[J].中国农村水利水电,2007,(3):44-47.
- [14] 张 辉,张玉龙,虞 娜,等.温室膜下滴灌灌水下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J].中国农业科学,2006,39:425-432.
- [15] 王 燕,蔡焕杰,陈新明,等.根区局部控水无压地下灌溉对番茄生理特性及产量、品质的影响[J].中国农业科学,2007,40(2):322-329.
- [16] 王淑红,张玉龙,虞 娜,等.保护地渗灌管的埋深对土壤盐动态及番茄生长的影响[J].中国农业科学,2003,36(12):1508-1514.
- [17] 孔德杰,张源沛,郑国保,等.不同灌水量对日光温室番茄耗水规律的影响[J].农业科学研究,2010,31(4):53-55.
- [18] 郭占奎,刘洪禄,吴文勇,等.日光温室覆膜滴灌条件下樱桃西红柿耗水规律[J].农业工程学报,2010,26(9):53-57.
- [19] 郑 健,蔡焕杰,王 燕,等.不同灌水方式下番茄产量构成因素分析及耗水规律研究[J].塔里木大学学报,2008,20(2):56-61.
- [20] 赵伟霞,蔡焕杰,单志杰,等.无压灌溉日光温室番茄高产指标[J].农业工程学报,2009,25(3):16-21.
- [21] 李 亮,张玉龙,马玲玲,等.不同灌溉方法对日光温室番茄生长、品质和产量的影响[J].北方园艺,2007,(2):75-78.
- [22] 孙 磊,孙景生,刘 浩,等.日光温室滴灌条件下番茄需水规律研究[J].灌溉排水学报,2008,27(2):51-54.
- [23] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同土壤水分条件下冬小麦根

- 系分布规律及其耗水特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007 (8): 18-21.
- [24] 董肖杰, 李淑文, 柴彦亮, 等. 不同供水条件对小南瓜产量及根系发育的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 17-20.
- [25] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 等. 不同水分条件对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5296-5305.
- [26] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
- [27] 李波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 39-44.
- [28] 范凤翠, 张立峰, 李志宏, 等. 日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水指标[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 83-88.
- [29] 陈新明, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压地下灌溉对番茄根系分布特征的调控效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 10-15.
- [30] 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等. 初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J]. 灌溉机械工程学报, 2014, 32(1): 77-81.
- [31] 于秀琴, 龔超银, 于景春. 温室微润灌溉对黄瓜生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(7): 159-163.
- [32] 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等. 埋深与压力对微润灌溉湿润体水分运移的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 129-133.
- [33] 陈鹏, 苏德荣. 地下滴灌对草坪土壤水分及根系分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 48-50.
- [34] 薛万来, 牛文全, 张俊, 等. 压力水头对微润灌溉土壤水分运动特性影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 7-10.

(上接第 121 页)

- [4] Mohanty B, Jana R. A Topography - Based Scaling Algorithm for Soil Hydraulic Parameters at Hill - slope Scales [C] // Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts, F, 2010.
- [5] Simfinek J, Van Genuchten M, Sejna M. The HYDRUS - 1D software package for simulating one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media [R]. California USA: University of California Riverside Research Reports, 2005.
- [6] 曹巧红, 龚元石. 应用 Hydrus - 1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 2(2): 139-145.
- [7] 吴元芝, 黄明斌. 基于 Hydrus - 1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 2(2): 66-73.
- [8] Phillips I. Modelling water and chemical transport in large undisturbed soil cores using HYDRUS - 2D [J]. Soil Research, 2006, 44(1): 27-34.
- [9] Naseri A, Hoseini Y, Moazed H, et al. Phosphorus transport through a saturated soil column: comparison between physical modeling and HYDRUS - 3D Outputs [J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 11(5): 815-823.
- [10] Shan Y, Wwang Q. Simulation of salinity distribution in the overlap zone with double-point-source drip irrigation using HYDRUS - 3D [J]. Australian Journal of Crop Science, 2012, 6(2): 238.
- [11] 李耀刚, 王文娥, 胡笑涛. 基于 HYDRUS - 3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 546-552.
- [12] 苏李君, 王全九, 白云岗, 等. 极端干旱地区葡萄根系吸水数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2013, 28: 88-92.
- [13] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展 [J]. 水利学报, 2004, 2(2): 68-76.
- [14] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [15] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [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.