

# 番茄种植地土壤水分传感器最佳埋设深度试验

韩玉国<sup>1</sup>, 武亨飞<sup>2</sup>, 杨培岭<sup>3</sup>, 王云琦<sup>1</sup>, 李波<sup>4</sup>, 孔清华<sup>5</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;  
2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 3. 中国农业大学  
水利与土木工程学院, 北京 100083; 4. 北京市水文总站, 北京 100039; 5. 北京市水利水电学校, 北京 100024)

**摘要:** 土壤水分传感器测定土壤含水率从而指导灌溉, 对于提高作物水分利用效率和产量都具有十分重要的意义。对番茄种植中产量与水分利用效率最佳的水分条件以及土壤水分传感器的最佳埋设位置进行了试验研究。结果表明, 在开花坐果期土壤含水率下限控制在 60% 的田间持水率, 结果盛期土壤含水率下限控制在 75% 的田间持水率是番茄生长的最优水分条件; 同时, 10—20 cm 土层土壤含水率能很好地代表计划湿润层内的平均土壤含水率(开花坐果期和盛果期  $R^2$  分别达到 0.95 和 0.85 以上), 把土壤水分传感器埋设于此土层深度比较合理。

**关键词:** 灌水下限; 土壤含水率; 土壤水分传感器; 番茄种植地

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)04-0260-04

中图分类号: S275.6

## Optimal Burial Depth of Soil Moisture Sensors for Tomato-planting Field

HAN Yu-guo<sup>1</sup>, WU Heng-fei<sup>2</sup>, YANG Pei-ling<sup>3</sup>, WANG Yun-qi<sup>1</sup>, LI Bo<sup>4</sup>, KONG Qing-hua<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. Beijing Hydrologic Station, Beijing 100089, China; 5. Beijing Water Conservancy School, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Soil moisture sensors are used to measure soil moisture content so as to guide irrigation, which has great significance for improving water use efficiency and crop yield. This study presents the best water condition for enhancing both the yield and the water use efficiency in tomato-planting field, and determines the optimal soil depth for burying soil moisture sensors. The results show that it is the optimal water condition for tomato growth when the lower limit of soil moisture content is 60% of field capacity at flowering and fruit bearing stage and 75% of field capacity at fruit stage; and meanwhile, the soil moisture content at 10—20 cm layer may better represent the mean soil moisture content of the designed irrigation layer ( $R^2 > 0.95$  and 0.85 for flowering and fruit bearing stage and fruit stage, respectively), so it is more reasonable to bury soil moisture sensors in the depth.

**Keywords:** lower level of irrigation limit; soil moisture content; soil moisture sensor; tomato-planting field

近年来,随着土壤水分传感器制造技术的日益成熟,它具有的精度高、快速、准确、可连续原位测定及无辐射等优点在土壤水分监测中越发凸显出来,并在精准灌溉中被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。因此,使用土壤水分传感器测定土壤含水率从而指导灌溉,对于精准农业中适时灌溉和提高作物产量都具有十分重要的意义<sup>[5-7]</sup>。

目前,利用土壤水分监测从而指导灌溉的方法主要有两种<sup>[8-10]</sup>:第一,以某一个深度的土壤相对含水量来指导灌溉,即当这一土层深度的相对土壤含水率达到灌水下限值时,就开始灌水;另一种方法就是以计划湿润层内的土壤平均含水量高低作为指导灌溉的依据,这是目前应用相对较多的一种方法。对土壤

收稿日期:2012-11-06

修回日期:2012-12-22

资助项目:北京市教委科学研究与研究生培养共建项目“北京山区生态风险监测与评估技术研究”;国家自然科学基金项目(51239009)

作者简介:韩玉国(1979—),男(汉族),内蒙古自治区通辽市人,博士,讲师,主要从事农业节水、流域生态和水土保持领域相关的工作。

E-mail: yghan@bjfu.edu.cn.

水分传感器而言,传感器造价较高,在同一土层剖面不同深度埋设多个传感器,势必增大系统的投资,影响系统的推广。因此,确定土壤水分传感器的最佳埋设位置,从而使用较少的传感器便可以获知整个土体大概的水分状况对于其广泛应用和推广都具有重要的价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地点选择在北京市通县永乐店北京市水利科学研究所节水试验站日光温室内进行,供试土壤为砂质黏壤土,土壤干容重为  $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,田间持水量  $28.6\%$ (质量含水量)。灌溉方式为滴灌,每行作物布置一条滴灌毛管,滴头流量是  $2 \text{ L/h}$ 。试验小区面积  $4.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ ,每个处理 4 次重复,灌水量由水表控制。另外,各处理的施用肥料种类、数量相同(定植前沟施磷酸二铵  $374.81 \text{ kg/hm}^2$ ,尿素  $149.93 \text{ kg/hm}^2$ ,硫酸钾  $224.89 \text{ kg/hm}^2$ ,并于第一穗果实膨大期追施尿素  $149.93 \text{ kg/hm}^2$ )。

### 1.2 供试材料

供试作物为番茄(中杂 101)。番茄于 6 月 12 日育苗,7 月 5 日定植,定植前选择长势良好均匀的幼苗,三叶一芯,株高  $20 \text{ cm}$ ,10 月 16 日试验结束。番茄的行距  $40 \text{ cm}$ ,株距  $30 \text{ cm}$ ,种植密度  $6 \text{ 万株/hm}^2$ 。试验用传感器采用中国农业大学制造的 SWR 型土壤水分传感器,试验前采用烘干法测定土壤含水率对传感器进行标定,传感器标定是为解决土壤水分传感器在特定土壤中的测量精度。

### 1.3 试验方法

本次试验将番茄生育期划分为 3 个阶段:苗期,定植到开花之前;开花坐果期,开花至第一穗果快速膨大期;盛果期,第一穗果实膨大期至收获结束。试验因素与处理详见表 1。根据番茄栽培经验,定植初期土壤含水率应保持在  $100\% f_c$ (田间持水量),以保证番茄幼苗的成活率。

表 1 不同生育期土壤含水量

处理	开花坐果期土壤含水率下限	结果盛期土壤含水率下限
T <sub>1</sub>	$75\% f_c$	$75\% f_c$
T <sub>2</sub>	$60\% f_c$	$75\% f_c$
T <sub>3</sub>	$45\% f_c$	$75\% f_c$
T <sub>4</sub>	$75\% f_c$	$60\% f_c$
T <sub>5</sub>	$60\% f_c$	$60\% f_c$
T <sub>6</sub>	$45\% f_c$	$60\% f_c$

注: $f_c$ 为田间持水量。

由于苗期株体尚小,需水强度也很小,苗期不再灌水。水分处理从开花坐果期开始。当计划湿润层内平均土壤含水率达到灌水下限限制值时,开始灌溉<sup>[11]</sup>,具体详见表 1。灌水上限相同,均为田间持水量的  $90\% f_c$ <sup>[12]</sup>。番茄开花坐果期计划湿润层深度取  $40 \text{ cm}$ ,盛果期取  $60 \text{ cm}$ 。

### 1.4 参数测定

(1) 土壤含水率的测定。土壤含水率采用 SWR 型土壤水分传感器测定,探针长度为  $10 \text{ cm}$ ,计划湿润层内的土壤水分每隔  $2\sim 3 \text{ d}$  测定 1 次,结合番茄根系的分布<sup>[13-15]</sup>,将探针垂直埋于对应土层的中央,每次取样的深度分别为: $0\sim 10 \text{ cm}$ , $10\sim 20 \text{ cm}$ , $20\sim 40 \text{ cm}$ , $40\sim 60 \text{ cm}$ ,获得番茄整个生育期的详细土壤水分资料。(2) 根系的测定。收获后取根样,取样用挖掘法。开挖的范围是供挖掘植株与四周相邻植株间距的中线形成的  $30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  矩形区域,取样间距为  $10 \text{ cm}$ ,每处理随机取 3 次重复,取根深度取决于番茄最大根深。根样取出后先在水中浸泡,然后用水冲洗过  $0.5 \text{ mm}$  筛使土壤与根分离,得到根的样品。用 Epson expression 1680 型扫描仪对根样进行扫描,扫描仪的分辨率设为  $400 \text{ dpi}$ 。扫描时为使根样的分枝不互相缠绕,将根样放入一个透明的托盘内,并注入  $3\sim 5 \text{ mm}$  深的水。扫描出的图像用 WinRHIZO 根系分析软件进行分析得到根样的根长。(3) 产量的测定。成熟后各小区单独收获,均以 4 次重复产量的平均值来代表该处理的实际产量。随机挑选 50 个番茄,称其单果质量,以平均值代表各处理的单果质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 番茄的根系分布

对于监测土壤水分指导作物灌溉而言,作物根系分布至关重要,对于番茄而言其根群主要分布在  $0\sim 60 \text{ cm}$  土层深度内<sup>[16-18]</sup>。由表 2 可知,随着根系向深层土壤的生长,根长密度随土层深度的增加而下降。由于 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 控制灌水下限较高,灌水频率较短,表层土壤经常保持湿润状态,因此表层根系生长旺盛, $0\sim 20 \text{ cm}$  根长密度占各层根长密度总和的  $68\%$  和  $55\%$ , $0\sim 40 \text{ cm}$  根长密度占各层根长密度总和的  $92\%$  和  $85\%$ ;而 T<sub>3</sub>,T<sub>4</sub>,T<sub>5</sub>,T<sub>6</sub> 在  $0\sim 20 \text{ cm}$  根长密度比例分别为  $44\%$ , $42\%$ , $41\%$  和  $43\%$ ;  $0\sim 40 \text{ cm}$  根长密度占各层根长密度总和的  $65\%$ , $72\%$ , $75\%$  和  $73\%$ 。因此,传感器的初步监测位置应该与番茄根系土层深度相一致,但传感器的最佳埋设位置是否为根系最为密集的地层是值得研究的。

表 2 整个根系根长密度随土层深度的变化

cm/cm<sup>3</sup>

深度/cm	处理					
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
0—10	2.64	2.33	1.05	0.91	0.84	0.86
10—20	1.00	1.02	0.60	0.67	0.56	0.44
20—30	0.73	0.97	0.36	0.54	0.62	0.31
30—40	0.59	0.82	0.41	0.59	0.62	0.20
40—50	0.19	0.64	0.41	0.60	0.39	0.39
50—60	0.15	0.14	0.46	0.28	0.25	0.12
60—70	0.05	0.08	0.39	0.14	0.13	0.12

## 2.2 水分利用效率和产量

在全生育期内,番茄产量和水分利用效率详见表 3。从表 3 可以看出,T<sub>1</sub> 虽然灌水量最多,但番茄产量却是 T<sub>2</sub> 处理的最高,说明整个生育期都保持较高的灌水下限,并不利于产量的形成。从水分利用效率来看,开花坐果期控制灌水下限为 45%*f<sub>c</sub>*,盛果期为 60%*f<sub>c</sub>* 的小区 T<sub>6</sub>,其水分利用效率最高。但是由于控制灌水下限最低,灌水最少,番茄在需水的关键期得不到充足的水分补充,因此产量最低,仅为 74.0 t/hm<sup>2</sup>。考虑到产量过低并不是人们所期望和能够接受的,所以产量最高,且水分利用效率也相对较高的 T<sub>2</sub> 为最佳的灌水处理。

表 3 不同处理灌水量、产量和水分利用效率比较

处理	灌水次数	灌水量/ (m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·m <sup>-3</sup> )
T <sub>1</sub>	15	3 708.1	87.2	23.5
T <sub>2</sub>	11	3 332.9	91.7	27.5
T <sub>3</sub>	8	3 126.6	84.3	27.0
T <sub>4</sub>	13	3 545.5	83.1	23.4
T <sub>5</sub>	9	2 851.4	76.0	26.7
T <sub>6</sub>	6	2 545.0	74.0	29.1

## 2.3 传感器最佳埋设深度

因作物在不同生长阶段的根密度存在变化,对番茄开花坐果期和盛果期两个阶段的土壤水分进行了区分。番茄开花坐果期从 8 月 9 日开始,到 9 月 11 日结束,历时 33 d,计划湿润层深度取 40 cm;番茄盛果期从 9 月 12 日开始,到 10 月 16 日结束,计划湿润层深度区 60 cm。数据分析过程中,希望得到与计划湿润层内平均土壤含水率相关程度极高的土层含水

率,以最少的信息丢失为代价减少观测数值,精简观测位置。数据分析过程中采用了番茄开花坐果期实测的 342 个数据,番茄盛果期实测的 288 个数据。分别以计划湿润层内平均土壤含水率与 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 的土壤含水率来做相关分析,得到不同处理之间计划湿润层内平均土壤含水量与计划湿润层内各层土壤含水率之间的线性关系。相关分析结果表明,试验中 6 个不同处理条件下,都表现出了相同的规律,即  $\theta_{0-40}$  与  $\theta_{10-20}$  相关性最好, $R^2$  都在 0.95 以上。 $\theta_{0-40}$  与  $\theta_{20-40}$  的相关性比较差。从相关分析可以看出,以  $\theta_{10-20}$  代表计划湿润层内平均含水率最为合适, $R^2$  都达到 0.95 以上。经 *F* 检验和回归系数 *t* 检验(表 4),自变量和常数项 *t* 检验的 *p* 值均不否认检验结果,因此可以认为  $\theta_{10-20}$  与  $\theta_{0-40}$  具有高度的线性相关关系。虽然 0—10 cm 的土壤含水率与计划湿润层内的平均含水率的相关性也很好,但是由于存在土面蒸发,表层土壤水分因周围环境因素变化太大,表层土壤水分受环境影响太剧烈。因此,0—10 cm 不被列为埋设传感器的土层。盛果期与开花坐果期的各处理计划湿润层内的平均土壤含水率与计划湿润层内各层土壤含水率的线性相关关系基本一致,表现为  $\theta_{0-60}$  与  $\theta_{0-10}$  和  $\theta_{10-20}$  的相关系数较大, $R^2$  都达到了 0.85 以上,而  $\theta_{0-60}$  与  $\theta_{20-40}$  和  $\theta_{40-60}$  的相关性都很差,不能反映计划湿润层内土壤含水率变化的趋势。从开花坐果期和结果盛期两个生育期综合来看,10—20 cm 土层内土壤含水率变化最能反映计划湿润层内平均土壤含水率变化趋势。因此,对于番茄种植而言,把土壤水分传感器埋设到 10—20 cm 土层,是比较理想的埋设深度。

表 4  $\theta_{10-20}$  与  $\theta_{0-40}$  的方差分析和回归分析

检验方法和检验值		处理					
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
<i>F</i> 检验	<i>F</i>	232.37	226.71	171.84	357.23	217.65	371.59
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0
<i>t</i> 检验	<i>t</i>	15.24	15.06	13.11	18.90	14.75	17.27
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0

注: $\theta_{0-40}$ 表示 0—40 cm 土壤平均含水率,其他符号依此类推。

### 3 结论

对于番茄种植而言,在开花坐果期土壤含水率下限控制在60%的田间持水率,结果盛期土壤含水率下限控制在75%的田间持水率,是产量与水分利用效率最佳的水平;同时,0—10 cm和10—20 cm土层的土壤含水率与计划湿润层内土壤水分关系较为密切,但0—10 cm的土壤含水率受周围环境因素影响较大,不建议将土壤水分传感器埋于此层,因此10—20 cm的土壤含水率更能很好地代表计划湿润层内的平均土壤含水率,把土壤水分传感器埋设于此土层深度是比较合理的。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8.
- [2] 袁光辉. 农田灌溉中需要探讨的几个问题[J]. 灌溉排水, 2004, 13(4): 19-21.
- [3] Coelho E F, Or D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 39(6): 1039-1049.
- [4] 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167-171.
- [5] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 216-221.
- [6] Jones S B, Blonquist J J M, Robinson D A, et al. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors(Part 1): Methodology[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1048-1058.
- [7] Benganem M. Low cost management for photovoltaic systems in isolated sitewith new IV characterization model proposed[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 748-755.
- [8] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.
- [9] 王凤新, 康跃虎. 用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 58-64.
- [10] Shock C C, Feibert Erik B C, Saunders L D. Irrigation criteria for drip-irrigated onions[J]. Scientia Horticulturae, 2000, 35(1): 63-66.
- [11] Shae J B, Steele D D, Gregor B L. Irrigation scheduling methods for potatoes in the Northern Great Plains [J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(2): 351-360.
- [12] 汪羽宁, 樊军, 李世清, 等. 小麦实时控制灌溉的土壤水分含量探头合理埋设深度研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(5): 10-11.
- [13] Esen H, Ozgen F, Esen M, et al. Artificial neural network and wavelet neural network approaches for modeling of a solar air heater[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(8): 11240-11248.
- [14] 田义, 张玉龙. 温室地下滴灌灌水控制下限对番茄生长发育、果实品质和产量的影响[J]. 干旱地区农业科学, 2006, 24(5): 88-92.
- [15] Georges T D, Leif T, Ali R. Yield and quality of tomato fruit under watertable management[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1997, 122(4): 491-498.
- [16] 诸葛玉平, 张玉龙. 塑料大棚渗灌灌水下限对番茄生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 767-771.
- [17] 李建明, 邹志荣. 灌溉土壤水分上限对温室番茄开花坐果期生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2000, 9(4): 71-74.
- [18] 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.

(上接第259页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [2] 廖克. 现代地图学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 罗胜, 郭海涛, 张保明. 矢量地图图幅裁剪技术研究[J]. 测绘工程, 2007, 16(4): 56-59.
- [4] 浦天宏, 娄雅斌. GIS采用高斯—克里格地图投影技术的研究[J]. 鞍山师范学院学报, 2008, 10(2): 38-41.
- [5] 王家耀, 孙群, 王光霞, 等. 地图学原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 邱洪钢, 张青莲, 路绍强. ArcGIS Engine 开发从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.