

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2013.01.015

质地和根系深度对水分探头埋设的仿真模拟

樊军^{1,2}, 王全九², 汪羽宁¹

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)



樊军

摘要: 利用 Hydrus-1D 模型模拟不同植物根系深度和不同土壤质地条件下的土壤水分动态与平衡, 研究了根系分布深度和质地对控制灌溉土壤水分探头埋设深度的影响, 并利用试验进行了验证。土壤质地和植物根系分布深度对探头埋设深度有显著影响, 砂壤土和壤土分别采用高频低灌量和低频率高灌量的方法。浅根系植物(10 cm)在砂壤土条件下探头埋设 5 cm 深度最佳, 但是根系深度增大到 30 cm, 探头应该埋设到 20 cm 深度。对壤土而言, 利用位于根系 1/2 至 1/3 处的探头控制灌溉。太浅的埋设深度会导致灌溉频率增大, 太深的埋设可能造成植物缺水。黏土条件下, 结果较为复杂, 探头的埋设深度需要田间试验研究。研究表明: 针对具体植物, 因其需水规律和生理特征的不同, 根据植物需水规律来调整探头的控制范围达到高效节水目的。

关键词: 土壤水分; 土壤质地; 灌溉; 计算机模拟; 入渗

中图分类号: S277.9; S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)01-0070-05

Simulated effects of texture and rooting depth on soil moisture sensor placement

Fan Jun^{1,2}, Wang Quanjiu², Wang Yuning¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil water dynamics and balance under various rooting depth and soil texture were simulated by the Hydrus-1D model to investigate the effects of soil texture and rooting depth on sensor depth in soil profile, and the simulated results were validated by experimental efforts. It is concluded that the soil texture and distribution of plant root has significant influence on the sensor depth. Soil moisture sensor should be buried at 5 cm under sand soil for plants with shallow roots (10 cm), while those should be buried at 20 cm depth for rooting depth of 30 cm. As for loam soil, sensor placement locates in the one third to two third rooting depth is best. Shallow sensor placement could increase irrigation frequency and deep sensor placement could results in plant water stress. The complex results were achieved under fine soil and plants with deep roots, therefore, field observation should be done for the buried depth of sensor in soil profile. In conclusion, it is useful to guide sensor placement by simulation for sand and loam soil, but it is not suitable for clay soil. Optimum sensor placement should be adjusted according to plant water requirement which affected by plant species. More detailed researches should be focused on the situations that sensor buried depth affected by non-uniform irrigation and temporal and spatial variations of plant roots.

Key words: soil moisture; soil texture; irrigation; computer simulation; infiltration

收稿日期: 2012-06-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B05); 国家自然科学基金资助项目(91025018, 41271239)

作者简介: 樊军(1974—)男, 陕西府谷人, 副研究员, 博士(fanjun@ms.iswc.ac.cn), 主要从事土壤物理研究。

王全九(1964—)男, 内蒙古丰镇人, 研究员, 博士生导师(wquanjiu@163.com), 主要从事土壤物理研究。

农业水资源的短缺问题日趋严重,精确灌溉被广泛研究以实现水资源的高效利用^[1]. 精量控制灌溉系统的研究和商业化是实现这一目标的重要步骤^[2-3]. 土壤水分探头可以被埋设到土壤的某个深度来监测水分含量的动态变化,并应用于灌溉管理. 张力计是最早被用来指导灌溉的仪器,但是张力计内部水泡的出现、陶土头上有机物质的生长、需要定时校准等限制了其在自动灌溉中的广泛应用. 水面蒸发器、植物茎流计、植物茎直径测量等也被用于自动灌溉控制^[4-5]. 随着现代电子和计算机技术的发展,很多商业水分传感器被用于土壤水分含量测量,其中有些被应用于自动灌溉控制,最典型的是美国 Acclima 公司的时域透射仪 (time domain transmission, TDT) 探头,它具有价廉、布线少、测量精确和控制简单等优点^[6-8].

但是,基于土壤水分含量控制的节水灌溉技术中,水分探头在土壤中的合理埋设深度是关键问题,作物的根系随着时间在生长变化,而埋设的探头深度是一定的,不同作物根系深度,探头埋设深度也应当不同,同时也受到土壤质地的影响^[9]. 埋设较浅的探头导致过于频繁的灌溉,因为浅层土壤会很快变干;而埋设较深的探头导致植物缺水或者过量灌溉,因为深层土壤含水量降低速度相对浅层要慢,水分需要更长时间入渗到探头的感应区域.

关于控制探头埋设深度目前报道不多,相关商业灌溉系统只给出推荐深度,田间试验确定埋设深度则费时费力. 文中利用 Hydrus - 1D 模型模拟研究土壤质地和根系分布深度对探头埋设深度的影响,利用试验进行验证,为自动精确灌溉提供一定的理论指导.

1 材料与方法

1.1 仿真模拟

应用 Hydrus - 1D 模型分别模拟在无地下水影响条件下具有不同根系分布深度的植物 (小麦,根系深度为 10, 30, 50 cm) 和不同土壤质地类型条件下的水量平衡. 模拟土壤深度为 200 cm,模型上边界条件使用参考作物蒸散量 $ET_0 = 4 \text{ mm/d}$,下边界条件为自由排水条件. 模拟根区距离地下水足够深,不受地下水影响. 初始含水量条件取田间持水量,使用土壤含水量的临界点来控制灌水,临界点是指在灌水之前土壤含水量降低到所允许的最低点,受植物和土壤质地影响,通过土壤萎蔫含水量和田间持水量来确定:

$$\theta_r = \theta_{FC} - \beta(\theta_{FC} - \theta_{PWP}), \quad (1)$$

式中: θ_r 为临界点含水量, cm^3/cm^3 ; θ_{FC} 为田间持水量, cm^3/cm^3 ; β 为水分消耗系数; θ_{PWP} 为萎蔫含水量, cm^3/cm^3 . 壤土和黏土田间持水量 θ_{FC} 取水势为 -0.033 MPa 时对应的含水量,萎蔫含水量 θ_{PWP} 取土壤水势为 -1.5 MPa 对应的含水量. 砂土取经验值.

Cuenca^[10]认为典型的水分消耗系数对于浅根系、中等根系和深根系植物分别取 0.33, 0.50, 0.67, 文中对应 10, 30, 50 cm 深度根系; β 分别取 0.33, 0.50, 0.67. 模拟灌溉过程为地面均匀定量灌溉,允许地表有积水. 模拟的土壤质地和相关参数见表 1,参数参考文献 [11] 中的报道值. 其中参数 θ_s 为饱和土壤含水量; θ_r 为残余土壤含水量; K_s 为土壤饱和导水率; α 为与进气吸力有关的参数; n 为形状系数.

表 1 3 种质地土壤水动力学参数

Tab. 1 Hydrodynamics parameters for three kinds of soil

土壤类型	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / (1 \cdot \text{cm}^{-1})$	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	$\theta_{PWP} / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_{FC} / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$
砂壤土	0.02	0.41	0.042	2.02	60.00	0.05	0.17
壤土	0.06	0.41	0.019	1.31	6.00	0.11	0.21
黏土	0.07	0.39	0.020	1.20	1.00	0.14	0.27

1.2 试验验证

1.2.1 室内试验

试验于 2008 年 9 月至 2009 年 2 月在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行. 供试土为壤土 (黑垆土), 试验材料为小麦 (耐干旱小偃 22), 在固定式透光遮雨棚内生长. 将风干过筛土壤装入 4 个土槽中,

土槽用透明有机玻璃制成,为边长 60 cm 的正方形,灌溉量按不同埋设深度探头控制. 4 个土槽内各埋设 6 个水分传感器探头,均从表面开始 5, 10, 20, 30, 40 cm, 以及距离底部 5 cm 各 1 个. 传统定量灌溉作为对照 (CK), 5 cm 深度土壤水分探头控制灌溉, 10 cm 探头控制灌溉和 20 cm 探头控制灌溉等 4 种方式. 播前将各个控制探头所在土层深度灌水至田间持

水量的 75%。灌水量为 10 mm/次,除 CK 外,其他 3 个处理具体灌溉用量根据控制探头所测定土壤水分含量而定^[12]。

1.2.2 野外试验

试验地点位于新疆维吾尔自治区吐鲁番市东南部的葡萄乡铁提尔村,试验葡萄品种为无核白,树龄 10 a,栽培方式为小棚架栽培,株距 1.2~1.5 m,行距 4.5 m,定植沟为东西走向,土壤质地为壤土,灌溉方式为地面沟灌。设置定量灌溉作为对照,20 cm 探头控制灌溉和 40 cm 探头控制灌溉 2 个处理^[13]。

2 结果与分析

2.1 根系分布深度对探头埋设深度的影响

由于根系分布深度不同,植物吸收利用土壤中水分的来源层次不同,浅根系植物显然更多地吸收上层土壤水分,灌溉主要用以补充上层土壤水,这样探头相应需要埋设浅,以控制上层土壤不出现萎蔫含水量,保证植物正常生长发育。随根系深度增大,探头的深度也相应增大,以维持根区水分含量。以壤土为例,每次灌溉 50 mm,用 Hydrus-1D 软件进行 60 d 模拟,模型输出水量平衡的各项,上边界通量为植物耗水量,从土壤水分剖面的日变化过程可以得出灌水的最大入渗深度。不同根系深度条件下,不同探头埋设深度(含水量控制深度)需要的总灌水量和灌水次数及相应水量平衡如表 2 所示。表中 D_r 为根系分布深度; D_s 为控制探头埋设深度; I_f 为灌水次数; I_t 为灌水总量; ET 为耗水量; D_i 为最大入渗深度; V_{2m} 为 2 m 土壤层储水量变化。

表 2 壤土不同根系分布深度对探头埋设深度的影响

Tab.2 Effects of rooting depth on sensor placement in loam soil

D_r/cm	D_s/cm	I_f	I_t/mm	ET/mm	D_i/cm	V_{2m}/mm
10	2	9	450	218	170	232
	5	6	300	196	130	104
	7	4	200	145	100	45
30	5	6	300	232	100	68
	10	5	250	225	90	25
	15	4	200	199	80	1
50	20	3	150	160	70	-10
	5	4	200	227	50(70)	-27
	10	4	200	216	50(70)	-16
	15	4	200	210	50(70)	-10
	20	4	200	201	50(70)	-1
	30	3	250	196	40(70)	54

注: 括号内为根系吸水的最大深度,即土壤含水量降低的最大深度。

对于 10 cm 浅根系植物而言,其消耗的土壤水

分大部分来自上层,导致表层水分含量快速降低,为维持埋设探头深度处土壤水分含量不低于 θ_r ,需要频繁的灌溉,而这些灌溉水分并没有被植物全部消耗,而是入渗到土壤中,最大入渗深度随着灌水量增大而增大。对比结果显示,对于 10 cm 深度根系植物,如果不考虑根系生长过程,控制探头埋设在 5 cm 深度处较为合适,因为这一灌水方式下土壤 2 cm 水分含量未出现低于萎蔫含水量情况(数据省略),说明植物生长并未受到干旱胁迫。但是,对于 7 cm 深度控制灌溉方式,进行 4 次灌溉过程中,2 cm 深度土壤含水量出现降低到萎蔫含水量现象,如图 1 所示。模拟中,对壤土,设定每次灌溉量为 50 mm,如果减少每次灌溉量,灌水总量降低,但是相应的灌水次数会增大。

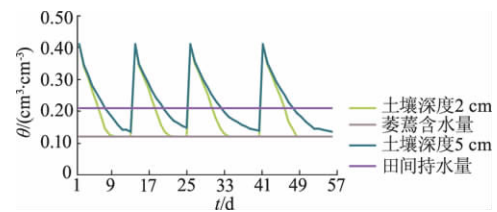


图 1 壤土控制探头埋深 7 cm 条件下不同深度土壤水分含量(θ)的动态变化

Fig. 1 Instantaneous soil moisture profile at different depths of loam soil for sensor placed under 7 cm from soil surface

对于 30 cm 深度根系植物,随着控制探头埋设深度增大,灌水次数减少,植物可以吸取较厚土层的水分,水分利用效率高。由于可以吸收更多土壤储水,减少了灌溉次数,使用埋深超过 5 cm 深度探头来控制灌溉。从水量平衡角度看,10 cm 和 15 cm 探头均可以作为控制探头,如果考虑植物开始生长,根系分布较浅的因素,10 cm 探头比较合适,模拟的植物潜在蒸散量在 60 d 时段内为 240 mm ($ET_0 = 4$ mm/d),灌溉 250 mm 水是合理的,而 20 cm 探头控制的灌水量低于植物需水量。室内模拟试验也显示,冬小麦生长前期用 10 cm 深度土壤水分探头控制灌溉,取得了最佳效果^[12]。

对于 50 cm 根系植物,利用 5~20 cm 共 4 个深度探头控制灌溉的水量和次数均相等,因为供给植物吸水的土壤厚度显著增大,不同灌水方式下植物耗水量差异不大,植物吸收利用了土壤储水,灌溉量偏低。30 cm 探头虽然灌水次数少,但是灌水后土壤水分需要更长时间的入渗与再分布,才能到达探头所处土层。模拟结果显示,土壤上层水分含量变异增大,土壤水分含量降低到萎蔫含水量的频率增大。

田间试验显示,对于成龄葡萄,其根系分布于 0~120 cm,较深的根系分布需要更多的水分入渗到土壤较深层次,以补充土壤水分的消耗。通过 1a 的野外试验发现,利用 40 cm 深度埋设的土壤水分探头控制灌溉,从土壤蒸发、水分利用效率及产量等方面,均取得了较为理想的结果^[13]。

总之,植物根系在土壤中的分布情况会影响控制灌溉水分探头的埋设深度。随着植物根系在土壤中分布深度的增大,探头的埋设深度增大,以减小灌溉频率与灌溉量。对于 10~50 cm 深度根系的植物,控制探头的深度一般适宜在 20 cm 以内。大棚试验和田间试验结果证实模型模拟得出的结论是合理的。太浅的埋设深度会导致灌溉频率增大,太深则造成植物生长过程中出现水分胁迫,特别是对于浅根系植物。同时深根系植物如果土壤内部储水量不高,也不宜埋设太深。此研究结果仅针对壤土,不同土壤质地,埋设深度也有所变化。

2.2 土壤质地对探头埋设深度的影响

选取 30 cm 深度根系植物作为模拟对象,对不同质地条件下,4 个不同控制深度探头的灌溉进行仿真模拟。由于砂土的入渗速度快,为避免水分大量渗出根区,设定每次灌溉 30 mm。对黏土,入渗很慢,也设定每次灌 30 mm,避免产生地表径流。壤土使用统一灌溉量,每次 50 mm,如表 3 所示。

表 3 土壤质地对灌溉探头埋设深度的影响
Tab. 3 Effects of soil texture on sensor placement

土壤质地	D_s/cm	I_f	I_f/mm	ET/mm	D_f/cm	V_{2m}/mm
砂壤土	5	15	450	240	>200	—
	10	12	360	240	>200	—
	15	11	330	240	>200	—
	20	10	300	238	>200	—
壤土	5	6	300	232	100	68
	10	5	250	225	90	25
	15	4	200	199	80	1
	20	3	150	160	70	-10
黏土	5	7	210	205	25	5
	10	6	180	195	25	-15
	15	4	200	180	60	20
	20	4	200	175	80	25

注:根系深度为 30 cm。

一般情况下土壤质地会显著影响灌溉水的入渗再分布过程^[14],同时也会影响植物根系吸水特征。粗质地土壤有较高的入渗速率,灌溉水入渗较快,探头埋设可以相应深些,而细质地土壤,入渗速率低,探头需要埋设浅一些。模拟结果显示,砂土由于入渗速度快,需要很高的灌水频率来维持土壤某个层次的含水

量。对比表 3 的耗水量结果,认为砂土控制探头应该埋设深于 5 cm,埋在 20 cm 深度的灌水次数和灌水量最少。植物基本没有出现缺水现象,因此 20 cm 是砂土的最适宜埋设深度。较浅的埋设深度易造成灌水过量,过量的水分迅速入渗离开根区,造成水资源浪费,同时也可能造成根区养分淋失。

黏土由于入渗率较低,造成灌溉水分入渗缓慢。探头埋设浅的情况下,采用高频率低灌量来调控探头所在土层水分含量。结果表明,灌溉量偏低,从模拟过程来看,由于灌水入渗最大深度 25 cm,造成根区下部土壤含水量显著降低。采用低频率、高灌量后(每次 50 mm),灌水入渗深度有明显增大,但总灌水量仍然偏低。在灌水过程中,特别是低频率、高灌量时,地表出现显著的积水层。如果田间没有挡水设施,很容易造成地表径流。此外黏土使用深层探头控制灌溉时,当土壤含水量低于 θ_r 后,进行灌溉需要 2~3 d 的入渗过程,灌溉水才能够到达控制探头,在这一过程中,下部根系可能会处于干旱胁迫状态,影响植物生长。因此控制探头不宜埋设于深层土壤。实际操作中,应该埋设的深度需要参照土壤导水率,使灌溉水在最短时间内到达探头埋设土层,避免植物受到干旱胁迫。

3 结 论

1) 砂壤土适宜采用高频低灌量的方法,用较深的埋设探头来控制;壤土采用低频率高灌量的方法,适宜用 10 cm 左右探头来控制。对于黏土或者根系分布深的植物,确定探头适宜埋设深度较为复杂,从模拟结果来看,无论是高频低灌量,还是低频高灌量,灌水量均偏低。

2) 利用数值模型仿真的方法,可以指导砂壤土和壤土控制灌溉的水分测量探头埋设最佳深度,但黏土结果不理想。对于 10~50 cm 深度根系的植物,控制灌溉探头的埋设深度一般适宜在 20 cm 以内。太浅的埋设深度会导致灌溉频率增大,太深的埋设会造成植物缺水。在壤土条件下,控制探头埋设在植物根系的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 处是合适的。

3) 针对具体植物,因其需水规律和生理特征的不同,可以根据植物需水规律来调整探头的控制范围,以达到节水灌溉效率的最大化。从模拟计算结果来看,基于探头控制的灌溉方法适合浅根系植物生长在砂壤土到壤土质地,而深根系植物和黏土情况

较为复杂 需要根据田间条件进行更精确的试验研究,可以利用多个探头进行分层综合控制的方法达到目的.同时为了达到精确灌溉的目的,应当进一步开展应用计算机模拟和田间试验研究植物根系的时空分布和非均匀灌溉等对这种方法的影响.

参考文献(References)

- [1] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 1-6.
Kang Shaozhong, Cai Huanjie, Feng Shaoyuan. Technique innovation and research fields of modern agricultural and ecological water-saving in the future[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 匡秋明,赵燕东,白陈祥. 节水灌溉自动控制系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 136-139.
Kuang Qiuming, Zhao Yandong, Bai Chenxiang. Automatic monitor and control system of water saving irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 136-139. (in Chinese)
- [3] 刘秀珍,郑德聪,马骏,等. 精确灌溉与施肥自动化管理系统的研制与实现[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 197-200.
Liu Xiuzhen, Zheng Decong, Ma Jun, et al. Accurate to irrigate and apply fertilizer automatic research of administrative system and realize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 197-200. (in Chinese)
- [4] Fernandez J E, Romero R, Montano J C, et al. Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree orchards, based on sap flow measurements[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2008, 59: 589-598.
- [5] 高峰,俞立,张文安,等. 基于茎直径变化的无线传感器网络作物精量灌溉系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 7-12.
Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Preliminary study on crop precision irrigation system based on wireless sensor networks for stem diameter microvariation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 7-12. (in Chinese)
- [6] Blonquist J M, Jones S B, Robinson D A. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1/2): 153-165.
- [7] Cardenas-Lailhacar B, Dukes M D, Miller G L. Sensor-based automation of irrigation on bermudagrass, during wet weather conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(2): 120-128.
- [8] Dukes M D, Scholberg J M. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(1): 89-101.
- [9] Qualls R J, Scott J M, De Ore W B. Soil moisture sensors for urban landscape irrigation: Effectiveness and reliability[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(3): 547-559.
- [10] Cuenca R H. Irrigation System Design: An Engineering Approach[M]. Englewood: Prentice Hall, 1989: 8-20.
- [11] Warrick A W. Soil Physics Companion[M]. Florida: CRC Press LLC, 2002: 60-80.
- [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): 10-12.
Wang Yuning, Fan Jun, Li Shiqing, et al. Soil water sensor placement for precise irrigation scheduling using soil moisture information[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 10-12. (in Chinese)
- [13] 汪羽宁,樊军,李世清,等. 控制灌溉探头埋设深度对成龄葡萄生长特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2062-2068.
Wang Yuning, Fan Jun, Li Shiqing, et al. Effects of sensor's laying depth for precision irrigation on growth characteristics of mature grapes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2062-2068. (in Chinese)
- [14] 李毅,任鑫, Horton Robert. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 485-490.
Li Yi, Ren Xin, Horton Robert. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 485-490. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)