

地下滴灌灌水器水力性能试验研究

件 峰, 李王成, 李金山, 范永申, 冯俊杰

(中国农业科学院农田灌溉研究所)

摘 要: 地下滴灌与地表滴灌的最大差异在于地下滴灌的灌水器出水口被土壤包围, 其出流受到土壤的限制。在室内将灌水器埋入土槽中, 模拟研究了灌水器类型、自由出流时的流量、工作压力、土壤初始含水率等因素, 对地下滴灌条件下灌水器水力性能的影响。试验结果表明: 灌水器埋入土壤后, 流量是其自由出流时流量的 $1/2 \sim 1/4$ 。方差分析表明, 影响地下滴灌灌水器水力性能的主要因素是自由出流时的水力特性和土壤特性。针对测试土壤, 建立了地下滴灌灌水器流量计算的修正关系式。

关键词: 地下滴灌; 灌水器; 水力性能

中图分类号: S275.4; S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)02-0085-04

1 引 言

地下滴灌是在滴灌技术日益完善的基础上发展而成的一种高效、节水的灌水技术, 将毛管埋于地下, 通过出水口将水或水肥的混合液送到作物根区土壤中, 供作物吸收。与地表滴灌相比, 地下滴灌进一步减少了地表的无效蒸发, 改善了作物根区的生长条件, 同时在方便田间管理, 防止毛管丢失、老化, 延长毛管的使用寿命等方面具有明显优势^[1~3,8]。因而在温室、果树及免耕的大田作物和水源奇缺地区有着广阔的应用前景。2000 年在南非召开的第 6 次国际微灌大会上, 地下滴灌技术被列为今后微灌发展的主要方向之一^[7]。美国加利福尼亚州大学灌溉技术中心主任 David F. Zoldoske 预言: “灌溉的未来将是地下滴灌”。地下滴灌技术发展前景看好^[5,6]。

目前我国地下滴灌的设计主要参照《微灌工程技术规范》, 系统是按照地表滴灌进行规划设计。地下滴灌的设计虽然与地表滴灌有一定程度的类同, 但也有其自身的特殊性和复杂性。由于滴灌毛管埋于地下, 毛管及出水口均被土壤包围, 受土壤的影响极大。一般来说^[9,10], 地下滴灌在灌水初期, 由于土壤含水率小, 在出水口周围存在一定的负压, 出水口的出流量较大, 随着灌水时间的延长, 出水口周围土壤的含水率增大, 出水口周围由负压向无压, 甚至正压力变化, 出水口流量趋于减小, 这是地下滴灌与地表滴灌存在的根本差异所在, 而以往对此研究较少。因此, 探讨地下滴灌灌水器水力特性, 为分析地下滴灌系统水力性能奠定基础, 进而为地下滴灌的设计及运行、管理提供理论依据。对提高地下滴灌设计的合理性, 有着十分重要的现实意义。

2 材料方法

2.1 试验设计

供试土壤取自农田灌溉研究所试验地, 土壤类型为

壤土, 土壤容重为 1.47 g/cm^3 , 田间持水量为 25% (质量含水率, 下同)。

地下滴灌条件下, 影响灌水器水力性能的因素主要包括: 灌水器类型、自由出流时的流量、工作压力、土壤初始含水率等。在室内采用正交试验方法, 由于同一灌水器类型中流量受生产厂家的限制, 难以选取到流量水平一致的 3 个因素水平, 因而选用正交表 $L_9(3^4)$, 暂不考虑 3 因素间的交互作用, 对以上因素进行试验。根据试验设备的能力, 按主因素将试验分为以下 3 组正交试验。

1) 影响灌水器因素正交试验

参考已有的研究成果^[4], 为了解影响地下滴灌灌水器流量的主要因素, 考虑了不同灌水器类型 (额定流量有所差别)、不同土壤初始含水率及不同工作压力等因素, 对地下滴灌灌水器流量的影响试验。

试验是在壤土中进行, 试验中以灌水器自由出流时流量为参考, 以灌水器类型、工作水头、土壤初始含水率作为试验因素, 分别考虑内镶式灌水器、补偿式灌水器、微管灌水器 (又称发丝管) 3 种类型的灌水器, 作为灌水器的 3 个因素水平; 工作水头分别按 $8.6, 4 \text{ m}$; 土壤初始含水率按占田间持水量的 90%~95%、70%~75%、45%~50%, 作为高、中、低 3 个水平。对应的正交试验因素设计见表 1。

2) 以灌水器类型为主因素的正交试验

试验条件与试验 (1) 类似, 但控制灌水器在自由出流量 (6 m) 基本一致的情况下, 进行试验。

3) 以灌水器流量为主因素的正交试验

由于补偿式灌水器 and 内镶式灌水器的流量多由生产厂家设定, 因而不易改变; 而微管灌水器的流量由采用的微管长度决定, 可以通过调节微管长度的方法获得设计流量下的灌水器。因此, 以灌水器流量为主因素的正交试验采用微管灌水器, 流量分别 $5.54, 3.14, 1.91 \text{ L/h}$ 代表对应的 A_1, A_2, A_3 三个水平, 其余各因素的水平控制同前。

收稿日期: 2002-07-15 修订日期: 2002-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50079029)

作者简介: 件 峰 (1969-), 男, 河南南阳人, 副研究员, 水利部, 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003

表 1 试验因素水平表

Table 1 Table of orthogonal experiment factors and levels

试验号	A 灌水器类型	B 外部水头	C 土壤初始含水率
1	A ₁ (内镶式)	B ₁ (高 10 m)	C ₁ (高含水率)
2	A ₁ (内镶式)	B ₂ (中 6 m)	C ₂ (中含水率)
3	A ₁ (内镶式)	B ₃ (低 4 m)	C ₃ (低含水率)
4	A ₂ (补偿式)	B ₁ (高 10 m)	C ₂ (中含水率)
5	A ₂ (补偿式)	B ₂ (中 6 m)	C ₃ (低含水率)
6	A ₂ (补偿式)	B ₃ (低 4 m)	C ₁ (高含水率)
7	A ₃ (微管)	B ₁ (高 10 m)	C ₃ (低含水率)
8	A ₃ (微管)	B ₂ (中 6 m)	C ₁ (高含水率)
9	A ₃ (微管)	B ₃ (低 4 m)	C ₂ (中含水率)

2.2 试验方法和观测内容

试验按组进行, 每组试验安排 9 个试验号, 2 次重复。将试验土壤风干过筛后, 调整其含水率, 达到预先设定的水平后, 按容重分层均匀装土。数据的收集主要以相同时间内的灌水量为主, 同时记录水温、气温等资料。灌水结束后观察和记录湿润锋边界, 并对土壤含水率进行测定。

为保证试验正常进行, 开始试验前, 对各灌水器进行人工灌水排气。试验以湿润锋到达土桶边沿时试验终止。

3 结果与分析

3.1 地下滴灌灌水器出流过程

地下滴灌条件下, 灌水器直接与土壤接触, 灌水器的出流规律不仅与其自身的水力性能有关。由于在试验前灌水排气, 灌水器出口处局部湿润或饱和, 试验中, 灌水器在土壤中的流量均不能达到其对应的自由出流时的流量, 地埋灌水器的出流明显受到土壤因素的制约。各次正交试验中, 实测地埋灌水器的流量随时间变化过程如图 1~3 所示。

从图 1~3 可以看出, 试验的 3 种灌水器, 埋入土壤后, 其流量随时间有所变化。在灌水初期, 由于灌水器周围土壤含水率较低, 灌水器出流速率与工作水头关系密切; 较短时间以后, 灌水器周围形成饱和圈, 土壤的扩散速率开始限制出流速率, 灌水器的流量波动下降; 随着时间的推移, 灌水器周围饱和区的增大, 水分向土壤四周的扩散速率逐渐减小, 并趋于稳定。

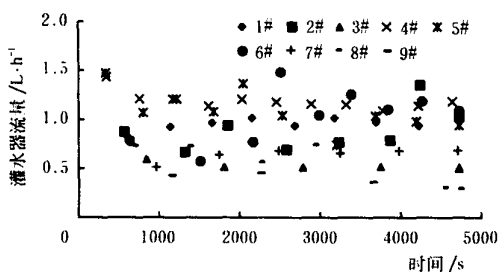


图 1 试验 1 流量随时间变化过程

Fig. 1 Discharge of emitter with time in the orthogonal test 1

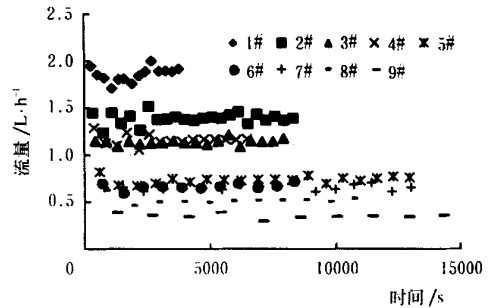


图 2 试验 2 流量随时间变化过程

Fig. 2 Discharge of emitter with time in the orthogonal test 2

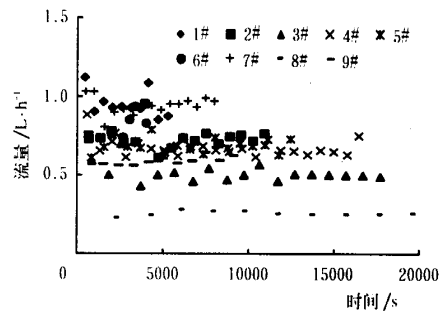


图 3 试验 3 流量随时间变化过程

Fig. 3 Discharge of emitter with time in the orthogonal test 3

从以上试验结果, 发现灌水器的流量随时间变化过程中, 灌水器流量变化段相对较短, 试验条件下, 多在 10 min 以内, 远小于地下滴灌的一次灌水时间, 在绝大部分灌溉中, 灌水器的流量相对稳定。因而, 在地下滴灌条件下, 可以认为灌水器在土壤中的出流为一定值, 灌水器流量按其其在土壤中稳定出流时的流量, 进行计算。

此外, 试验中发现, 灌水器额定流量和土壤初始含水率直接影响着湿润锋在土壤中的推进速度, 在较大的灌水器流量和较高土壤初始含水率, 湿润锋推进较快。

3.2 影响地下滴灌灌水器出流因素分析

表 2 为 3 次正交试验前后实测的灌水器流量。从表中可以看出, 灌水器埋入土壤后, 其流量比自由出流小得多, 一般为其自由出流的 1/2~1/4 倍左右。

为了解地下滴灌条件下, 灌水器类型、流量、工作水头、土壤初始含水率等因素, 对地下滴灌灌水器出流的影响及其影响程度, 采用方差分析的方法, 对以上各因素的方差平方和、均方差等进行计算, 分析误差的来源, 并把计算结果与不同置信度下的 F 值进行比较, 分析各组试验中的因素水平, 从而说明以上各因素对地下滴灌灌水器出流的影响程度, 为分析地下滴灌条件下灌水器水力性能做准备。

3.2.1 影响因素

试验 1 中, 测量了埋在每个土桶中灌水器的流量, 通过对流量的误差来源计算, 试验 1 的方差分析结果如表 3。

表 2 地下滴灌灌水器流量与自由出流流量对比

Table 2 Discharge comparison of emitters in soil and in air L · h⁻¹

试验号	入口压力/m	8 00	6 00	4 00	8 00	6 00	4 00	8 00	6 00	4 00
	土壤含水率	高	中	低	中	低	高	低	高	中
试验 1	灌水器	内大	内大	内大	补大	补大	补大	微管	微管	微管
	土壤中流量	0 95	0 89	0 53	1 19	1 09	1 03	0 64	0 94	0 43
	空气流量	3 37	2 81	—	4 02	3 70	3 98	1 83	1 47	0 92
试验 2	灌水器	内大	内大	内大	补小	补小	补小	微管	微管	微管 8
	土壤中流量	0 95	0 73	0 41	0 67	0 69	0 94	0 94	0 32	0 48
	空气流量	3 37	2 81	—	2 39	2 54	3 18	3 74	2 91	1 99
试验 3	灌水器	微管	微管	微管	微管	微管	微管	微管	微管	微管
	土壤中流量	1 88	1 39	1 14	1 16	0 74	0 66	0 66	0 52	0 35
	空气流量	7 44	5 54	3 49	4 01	3 14	1 96	2 57	1 91	1 29

表 3 试验 1 正交试验结果方差分析

Table 3 Analysis of variance in orthogonal test one

方差来源	平方和	自由度	均方差	F
滴头类型	0 325	2	0 162	57 520
工作水头	0 184	2	0 092	32 587
初含水率	0 064	2	0 032	11 324
误差	0 006	2	0 003	

从上面的方差分析表可以看出, 以上 3 因素对地下滴灌灌水器水力性能的影响程度不同, 在 90% 的置信度 ($F_{0.90}(2, 2) = 9$) 下, 以上 3 因素均呈显著水平; 在 $F_{0.95}(2, 2) = 19$, 滴头类型、工作水头两因素均呈显著水平。因而, 影响地下滴灌灌水器出流的主要因素为灌水器类型(这里包含了灌水器流量因素)和工作水头, 其次是土壤的初始含水率。

3.2.2 灌水器类型的影响

表 4 是试验 2 的方差分析结果。从表中可以看出: 在灌水器额定流量一致的情况下, 灌水器类型在 90% 的置信度时不显著, 同时其它两因素也呈不显著水平。

表 4 以灌水器类型为主因素的正交方差分析表

Table 4 Analysis of variance in orthogonal test with main factor of emitter

方差来源	平方和	自由度	均方差	F
滴头类型	0 031	2	0 016	0 148
工作水头	0 118	2	0 059	0 559
初含水率	0 006	2	0 003	0 030
误差	0 070	2	0 035	

3.2.3 灌水器自由出流流量的影响

表 5 为不同流量的微管灌水器的正交试验方差分析结果表, 从表中可以看出: 灌水器额定流量因素在

表 5 不同流量的正交试验结果方差分析表

Table 5 Analysis of variance in orthogonal test with main factor of emitter discharge

方差来源	平方和	自由度	均方差	F
流量	0 471	2	0 236	59 002
工作水头	0 139	2	0 069	17 375
初含水率	0 017	2	0 008	2 0712
误差	0 008	2	0 004	

95% 的置信度下呈显著水平, 说明影响地下滴灌灌水器出流的主要因素为灌水器的初始流量。同时由于微管灌水器的流量与压力关系密切, 因而工作压力也呈较高的显著水平(90%)。

3.3 地下滴灌灌水器出流规律

从以上试验结果及分析知: 灌水器埋入土壤后, 其流量比自由出流小得多。究其原因, 主要是由于土壤的限制, 由灌水器灌入土壤的水量不能迅速扩散, 在灌水器出口处形成有压水流, 进而影响灌水器的出流。地下滴灌灌水器的流量与灌水器的自由出流时的流量关系最大, 其次是工作水头。

通过对地下滴灌灌水器在不同工作压力和对应的流量分析, 并与地表滴灌比较, 得出地下滴灌条件下, 灌水器的流量计算, 可采用以下修正关系式。

$$q_s = q/K_{soil}$$

式中 q_s ——地下滴灌灌水器的流量, L/h; q ——灌水器自由出流时的流量, L/h; K_{soil} ——地下滴灌灌水器的流量修正系数。地下滴灌灌水器的流量修正系数 (K_{soil}) 主要与土壤因素有关, 试验土壤的流量修正系数在 2.0~4.0 之间。对于微管灌水器, 其流量修正系数在 3.75~3.85 之间。

4 结 论

1) 地下滴灌条件下, 灌水器的流量随时间而变化, 在灌水的初期, 灌水器的流量接近其自由出流时流量, 此后灌水器的流量波动下降, 最终达到稳定值。因而, 在地下滴灌条件下, 灌水器流量可以在土壤中稳定出流时的流量, 作为地下滴灌灌水器的设计流量。

2) 灌水器埋入土壤后, 流量是其自由出流时的 1/2~1/4。地下滴灌灌水器正交试验表明, 影响地下滴灌灌水器出流的主要因素有灌水器的初始流量, 此外土壤因素也是影响灌水器的主要因素之一。

3) 地下滴灌条件下, 灌水器流量的修正关系式为: $q_s = q/K_{soil}$, 灌水器的流量修正系数 (K_{soil}) 主要与土壤因素有关, 试验土壤的流量修正系数在 2.0~4.0 之间。

致谢: 农田灌溉研究所彭贵芳研究员和中国水利水电科学研究院龚时宏研究员参加了该研究; 中国水利水电科学研究院李久生研究员对本文提出了宝贵的意见, 在此表示感谢!

[参 考 文 献]

- [1] Camp C R. Subsurface drip irrigation: a review [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1353~ 1367.
- [2] Phene C J. Maximizing water use efficiency with subsurface drip irrigation[Z]. ASAE Paper 922090, Charlotte, NC, 21~ 24 June 1992b.
- [3] Phene C J. Maximizing water-use efficiency with subsurface drip irrigation[J]. Irrigation Journal, 1993, (3).
- [4] Shani U, Xue S, Gordin Katz R, et al. Soil limiting flow from subsurface emitters: I: pressure measurements[J]. J of Irrig and Drain Enging, 1996, 122(5): 291~ 295.
- [5] 陈仰斗, 段中锁. 渗灌技术应用浅析[J]. 灌溉排水, 1996, 15(2): 62~ 63.
- [6] 程先军, 许迪. 地下滴灌技术发展及应用现状综述[J]. 节水灌溉, 1999, (4): 13~ 15.
- [7] 李光永. 世界微灌发展态势[J]. 节水灌溉, 2001, 106(2): 24~ 27.
- [8] 马孝义, 王凤翔. 陕西省果树地下滴灌的应用前景, 存在问题与建议[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 127~ 131.
- [9] 岳兵. 渗灌技术存在问题与建议[J]. 灌溉排水, 1997, 16(2): 40~ 44.
- [10] 张国祥等. 对运城地区地下滴灌工程建设中若干技术问题的参考意见[J]. 微灌信息, 1995, (3).

Hydraulic characteristics of emitter in soil of subsurface drip irrigation system

Wu Feng, Li Wangcheng, Li Jinshan, Fan Yongshen, Feng Zunjie
(Fam Irrigation Research Institute, CAAS, Henan 453003, China)

Abstract: There is remarkable difference of hydraulic characteristic of emitter between in subsurface drip irrigation (SDI) and in drip irrigation (DI). Emitters of SDI are closed by soil and their discharges are directly effected by the soil. Under the SDI condition, experiments on the effect of hydraulic characteristic of emitter were carried out with the following factors under observation: type, discharge, work pressure of emitter and initial soil moisture. Based on these orthogonal test, it was found that the discharge of emitter in soil will be $1/2 \sim 1/4$ of that in air. Charges of emitter discharge in the soil are mainly effected by their emitter hydraulic and soil characteristics. A modified formula of emitter discharge was developed for the tested soil.

Key words: subsurface drip irrigation; emitter; hydraulic characteristics