

无压根区地下灌溉技术试验研究

陈新明¹, 蔡焕杰¹, 王占兵², 刘立库²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2 陕西省兴平市水利局, 兴平 713100)

摘 要: 对局部控水灌溉——无压根区地下灌溉技术从理论上进行了分析, 并给出了其边界条件下的土壤水分运动方程, 通过大田试验和室内机理试验, 研究分析了无压灌溉不同孔径孔口出水规律和根区局部湿润状况。试验结果表明: 无压孔口出水规律与孔口孔径、地温和土壤含水率等因素有关; 出水孔口孔径和初时土壤含水率对湿润锋推进速度影响较大, 孔径和初始土壤含水率越大, 湿润锋推进速度越快; 适宜的出水孔径条件下, 沿管道长度方向出水均匀, 5~35 cm 土壤含水率变化无明显差异。试验证明输水管埋深为 20 cm 时, 出水孔径为 3×Φ4 mm 的出水量能够满足根系分布在这一深度范围内的蔬菜作物需水要求。

关键词: 无压根区地下灌溉; 孔口出水; 土壤水分; 试验研究

中图分类号: S275.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0076-04

0 引言

我国是一个缺水国家, 近年来在节水灌溉研究的基础上, 提出了限水灌溉(Limited Irrigation)、非充分灌溉(Non-full Irrigation)、调亏灌溉(Regulated Deficit Irrigation)和分根交替灌溉(Control Root-divided Irrigation)等先进的节水灌溉技术。这些技术的研究从时间和空间上考虑调亏和水量对作物需水量的优化分配, 提高了灌溉水的利用效率。无压根区地下灌溉技术, 是通过试验研究探索出的一种新的局部控水灌溉技术, 即输水管埋在地下作物耕作层, 沿输水管长度方向有许多小的出水孔口, 在输水管首端无压、小水头压力或小的负压状态下, 利用土壤吸力和作物蒸腾力, 使水分通过出水孔口进入作物根系层, 满足作物生理需水。由于无压根区地下灌溉是湿润区向干燥区的侧向水分运动, 减少了土壤湿润面积和棵间蒸发损失, 同时减小了深层渗漏, 因此, 达到了提高水、肥利用效率。

1 无压灌溉的理论依据

无压根区地下灌溉也是局部控水灌溉, 它的基本理论依据仍然是土壤水分运动规律和能量守恒定律, 但作为一种新的灌溉技术, 它也有自己的特征和属性。

无压根区地下灌溉土壤水分运动是非饱和土壤水分运动, 水分运动以垂直方向为主, 若假设: 土壤为各向同性的多孔介质; 土壤中不存在对水分流动的空气阻力; 不计温度变化的影响; 土壤扩散率和导水率都是土壤水分含水率的单值函数, 则无压灌溉条件下土壤水分运动控制方程可简化为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S \quad (1)$$

式中 θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; x, z ——平面坐标, 规定 z 向下为正; $K(\theta), D(\theta)$ ——分别为土壤的非饱和导水率和扩散率, $\text{cm}/\text{h}, \text{cm}^2/\text{h}$; t ——时间, h ; S ——土壤根吸水函数, $\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{h}$ 。

水分运动的驱动力是水势梯度, 即水总是从水势高处向水势低处流动。无压灌溉根系层土壤水势总是低于多孔管内的水势, 在水势梯度驱动下, 水分由多孔管进入根系层。随着时间推移, 根系层土壤含水率增大, 土壤阻力增加, 水分进入根系层速度逐渐减小, 最终达到根系层土壤水势与多孔管内的水势平衡。

无压根区地下灌溉是湿润局部根区, 减小了棵间土壤蒸发和根区深层渗漏, 提高贮存在根区的水分有效性。由于无压根区地下灌溉出水孔口在作物根系层, 减少了棵间土壤湿润面积, 因此, 减少了棵间土壤蒸发, 同时, 由于根区局部区域干燥和局部区域湿润, 存在局部湿润区域向干燥区域的侧向水分运动, 加之总的灌水量小, 使灌水入渗深度减小, 因而有更多的水分被保持在根区范围内, 减少了深层渗漏。提高了灌水-根系土壤贮水-作物根系吸水之间的转化效率和水的有效性, 有利于提高水分利用效率。

2 试验研究方法

试验区位于关中盆地中部, 渭河以北的二级滩地, 属于大陆性气候, 一年四季分明, 雨热同季, 为半湿润半干旱地区, 年平均气温 12.69℃。试验区土壤为壤土, 土壤容重为 1.49 g/cm^3 , 田间最大持水率 23%。

2.1 试验布置

试验区长 6 m, 宽 5 m, 设 2 个重复。试验前, 人工挖两条长、宽、高为 3 m×0.5 m×0.5 m 的沟槽, 将土破碎, 风干, 用 10 mm×10 mm 的筛子过筛。回填时, 将土拌匀, 按容重分层均匀回填装土。为了防止降雨对试验的影响, 试验区上部采用拱型防雨棚。

2.2 试验仪器、材料

供水容器为 10 L 的透明圆形有机玻璃马氏瓶, 以确保供水水头为零, 同时可控制供水量。输水管为 Φ16PE 管, 每隔 0.3 m 打一个出水孔。试验孔径分 Φ2

收稿日期: 2003-06-13 修订日期: 2003-10-20

基金项目: 国家高新技术发展计划(863)项目(2001AA 242051); 国家重大科技专项(2002AA 2Z4031)部分内容

作者简介: 陈新明(1968-), 男, 高级工程师, 从事节水灌溉技术和作物灌溉制度研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100

mm、Φ3 mm、Φ4 mm、2 × Φ4 mm (2 个 Φ4 mm 孔), 3 × Φ4 mm (3 个 Φ4 mm 孔)和 Φ12 mm 6 组进行。输水管埋深 0.2 m, 铺设坡度为零。土壤含水率采用烘干法测定。

2.3 试验装置和试验过程

根据马氏瓶原理设计一个透明的圆形有机玻璃供水容器, 顶部设置有可启闭密封盖的进水口, 底部有出水口和压力平衡口, 出水口与 Φ16 PE 输水管连接。供水容器加满水后, 用密封盖封住进水口。打开压力平衡口, 水从压力平衡口流出, 水流慢慢减小, 最终停止。此时打开出水口上的闸阀, 由于水总是由能量高的地方向能量低的地方运动, 在土壤吸力作用下, 水进入输水毛管, 从

出水孔进入土壤中, 湿润出水孔周围的土壤。储水容器内的水进入土壤中, 储水容器内形成一定负压, 此时空气便从压力平衡口进入储水容器内, 这样, 始终保持毛管进水口压力为零或近似为零。

根据研究内容, 试验严格按照规范进行。观测收集数据有: 灌水前土壤含水率; 相同时间灌水量; 停水时不同孔径的湿润直径; 停水时 5~ 15 cm、15~ 25 cm、25~ 35 cm 深度的土壤含水率; 气温, 地温等。对陶瓷头出水增加观测不同时刻的负值。

3 试验结果与分析

不同出水孔口无压灌溉试验结果如表 1, 表 2。

表 1 不同出水孔口孔径灌溉参数
Table 1 Irrigation parameter at different aperture diameters

出水孔径	灌溉时间 /h	单孔平均出水量 /mL · h ⁻¹	湿润直径 /cm	土壤含水率/%		
				5~ 15 cm	15~ 25 cm	25~ 35 cm
Φ2 mm	93	0.51	—	5.56	11.12	7.77
Φ3 mm	76.3	3.8	8.0	11.18	16.73	11.03
Φ4 mm	65	10.5	15.5	13.85	17.82	10.97
2 × Φ4 mm	58	14.5	16.2	13.63	18.01	14.21
3 × Φ4 mm	51	19.6	17.5	14.22	19.24	16.24
Φ12 mm	42	27.5	18.4	16.49	22.16	19.57

表 2: 陶瓷头出水参数
Table 2 Outlet water yield parameter of ceramic-head

灌溉时间 /h	灌溉水量 /mL	单孔出水量 /L · h ⁻¹	侧压管值 /cm	土壤含水率/%		
				5~ 15 cm	15~ 25 cm	25~ 35 cm
305	1889.4	2.1	- 14.8	5.25	15.48	10.52

注: 表中土壤含水率和湿润直径是灌溉结束时各出水孔平均值。侧压管值为平均值, 最大值为- 31 cm。

3.1 无压灌溉出水过程

无压根区地下灌溉条件下, 出水孔与土壤直接接触, 孔口出水规律与土壤因素有关。不同孔径孔口出水量随时间变化如图 1 所示。

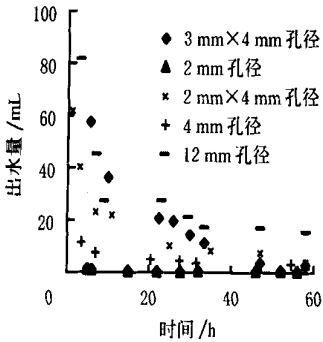


图 1 出水量变化过程曲线

Fig. 1 Process curve of outlet water yield variation

从图 1 可以看出, 灌溉开始阶段, 由于孔口周围土壤含水率较低, 土壤负压大, 吸力大, 孔口出水量大, 随着灌水时间的延长, 孔口周围土壤含水率增大, 并形成饱和区, 土壤的扩散速率开始限制孔口流出速度, 孔口出水量逐渐下降; 随着时间的推移, 孔口周围的饱和区扩大, 水分向四周扩散速率逐渐减小, 并趋于稳定。Φ3

mm、Φ4 mm 和 Φ12 mm 孔口出水表现的特别明显, Φ3 mm 开始孔口出水量为 11.5 mL/h, 趋于稳定时为 3.8 mL/h。Φ4 mm 开始孔口出水量为 57.4 mL/h, 趋于稳定时为 10.5 mL/h。而 Φ2 mm 孔口出水量很小, 93 h 结束时平均值为 0.51 mL/h。

3.2 孔口出水规律

从试验结果和上面的分析可知: 无压灌溉孔口出流量比其自由出流小的多, 这是由于土壤吸力是孔口水分运动的动力, 水分进入孔口周围的土壤后, 在土壤的阻力限制下, 不能迅速扩散, 进而影响孔口出流。试验表明无压孔口出水规律与孔口孔径、地温和土壤含水率等因素有关。

此外, 试验中发现, 出水孔口孔径和初时土壤含水率对湿润锋的推进速度影响较大, 出水孔口孔径和初时土壤含水率越大, 湿润锋推进速度越快。

3.2.1 孔口出水与孔口孔径的关系

通过对不同孔口孔径的无压灌溉试验, 孔口孔径越小, 出水量越小, 孔径越大, 出水量越大。根据试验资料, 在输水管和进气口相对高差为 0 时: 孔径和孔口出水量拟合曲线如图 2 所示, 相关系数 $R = 0.977$, 关系式可表示为

$$q = - 10.09 + 5.9762d - 0.1863d^2 \quad (2)$$

式中 q ——出水量, mL/h; d ——孔口直径, mm。

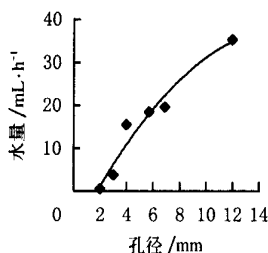


图2 孔口直径与出水量曲线

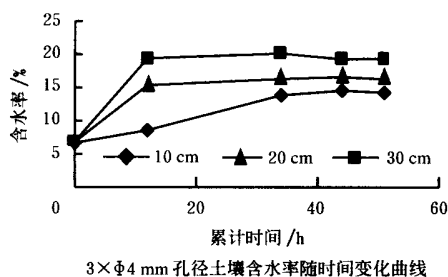
Fig. 2 Relationship between aperture diameter and outlet water yield

3.2.2 孔口出水与地温的关系

陶瓷头侧压管观测值表明, 孔口出水量与地温有很大关系, 每天早晨 8:00 地温低 (18℃), 侧压管负压值大 (最大值 -31 cm), 下午 2:00 地温高 (31℃), 压管负压值小。2002 年 8 月 27 日到 9 月 10 日观测变化如图 3 所示。这说明温度不仅改变土壤的饱和导水率, 也会改变土壤干湿处的界面吸力, 土壤的饱和导水率是温度的函数。Plillsbury、Constantz、Hopmans 认为温度对土壤饱和导水率 K_s 和非饱和导水率 $K(h, T)$ 的影响都可归结为温度对水粘滞系数 η 的影响, 因此, 在某一含水率情况下, 温度对 $K(h, T)$ 的影响可以单一地归结为温度对 η 的影响, 即

$$K_T(\theta) \eta(T) = K_{T_{re}}(\theta) \eta_{T_{re}} = K^*(\theta) \quad (3)$$

式中 $K_T(\theta)$, $K_{T_{re}}(\theta)$ ——任一温度 T 与参考温度 T_{re} 的非饱和导水率; $\eta(T)$, $\eta_{T_{re}}$ —— T 与 T_{re} 时的水粘滞度; 粘滞度函数 $K^*(\theta)$ 是 $K(\theta)$ 的规格化形式, 表示任



一温度的土壤导水性能。

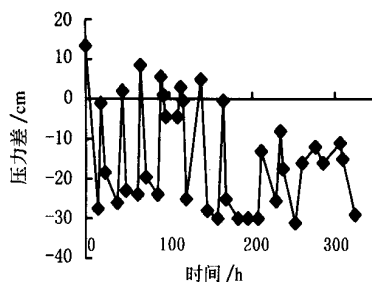


图3 孔口压力差随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curve of outlet pressure difference with time

3.2.3 孔口出水与土壤含水率的关系

通过观测不同孔径、不同时间的孔口出水和不同深度土壤含水率发现, $\Phi 2$ mm 孔径出水稳定后, 5~15 cm 深土壤含水率平均值为仅 5.56%, 在作物凋萎系数以下, 15~25 cm 土壤含水率为 11.12%, 25~35 cm 土壤含水率为 7.77%, 根本不能满足作物正常生长需要; $\Phi 3$ mm 孔径出水稳定后, 5~15 cm 深土壤含水率平均值为 11.18%, 15~25 cm 为 16.73%, 25~35 cm 为 11.03%, 与作物适宜土壤含水率相比偏低, 基本能满足作物出苗需水和生理需水, 但对蒸发量较大的作物, 如果树、棉花则不能满足其生理需水和正常产量生产的需水; $\Phi 4$ mm、 $\Phi 12$ mm 的孔口出水, 其 5~15 cm 土壤含水率为 14.55%, 15~25 cm 为 19.31%, 25~35 cm 为 15.25%, 能够满足作物生理需水要求。土壤含水率变化见图 4 所示。

同时从图 4 可看出, 沿管道长度方向各个孔口的土壤含水率变化无明显差异, 孔口出水均匀, 灌水均匀度能够满足灌溉要求。

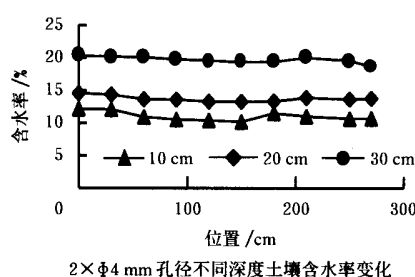


图4 土壤含水率变化曲线

Fig. 4 Variation curve of soil water content

4 结 论

1) 无压灌溉孔口出水量随时间而变化, 灌水初期, 孔口出水量大, 随着灌水时间的延长, 孔口出水量逐渐下降, 并趋于稳定。 $\Phi 2$ mm 孔口出水量很小, 开始时为 1.2 mL/h, 93 h 平均值为 0.51 mL/h, 说明出水孔口的孔径太小, 孔口出水量小, 甚至不出水;

2) 无压孔口出水规律不仅与孔口孔径有关而且和地温、土壤含水率等因素有关。同时初时土壤含水率对湿润锋的推进速度影响较大, 出水孔口孔径和初时土壤

含水率越大, 湿润锋推进速度越快。温度不仅改变土壤的饱和导水率, 也会改变土壤干湿处的界面吸力, 土壤的饱和导水率是温度的函数。

3) 输水管埋深 20 cm 时, 沿管道长度方向, 不同时间 5~35 cm 土壤含水率变化无明显差异, 孔口出水均匀, 灌水均匀。 $3 \times \Phi 4$ mm 的孔径, 灌水 51 h 15~25 cm 土壤含水率达 19.31%, 说明无压根区地下灌溉适宜的出水孔径能够满足辣椒、黄瓜等蔬菜作物需水和生理需水要求。

4) 无压灌溉提高了灌水-根系土壤贮水-作物根

系吸水之间的转化效率和水的有效性, 有利于提高水分、养分利用效率。

5) 本文是阶段性试验成果, 目前正在进行种植辣椒、黄瓜和西红柿蔬菜试验, 相关有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 雷志栋, 谢传森, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 清华大学出版社, 1998, 10

[2] 史文娟, 胡笑涛, 康绍忠. 干旱缺水条件下作物调亏灌溉技术研究状况与展望[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 2: 84-88

[3] 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]. 中国农业出版社, 2002, 1.

[4] 汪志荣, 张建丰, 等. 温度影响下土壤水分运动模型[J]. 水利学报, 2002, 3

[5] 何 华. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 6

[6] 马孝义, 康少忠. 果树地下滴灌灌水技术田间研究[J]. 西北农业大学学报, 2001, 1.

[7] 王 伟, 李光永. 利用工程措施改变地下滴灌土壤湿润模式的试验[J]. 节水灌溉, 2000, 3

Experiment of non-pressure subsurface drip irrigation

Chen Ximm ing¹, Cai Huanjie¹, Wang Zhanbing², Liu Liku²

(1. College of Water Resources and A rchitectural Engineering, N orthw est Sci-Tech University of A griculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2 The City of X ingping Water Supply Office, X ingping 713100, China)

Abstract: The experiment of non-pressure subsurface drip irrigation was conducted. The non-pressure subsurface drip irrigation, a kind of local water control irrigation. The law of outlet flow rate at different aperture diameters and the soil water status under the condition of non-pressure irrigation were studied. The results indicated that the outlet flow rate of non-pressure aperture was related to aperture diameter, soil temperature and soil water content, etc; The moving velocity of wetting front was influenced mostly by aperture diameter and initial soil water content; The larger aperture diameter and initial soil water content were, the faster moving velocity of wetting front was; The outlet flow rate was uniform under the condition of aperture diameter from 5 to 35 cm along the pipeline, and the soil water content was also not significantly changing with depth. It was proved that the outlet flow rate of 3 × Φ4 mm aperture diameter at non-pressure subsurface drip irrigation could fulfill the water requirement of vegetable crop when root-age depth was 20 cm soil layer.

Key words: non-pressure irrigation; aperture diameter and outlet discharge; soil water content; experiment