

草坪在地下滴灌条件下的土壤水分运移规律研究

黄志勇^{1,2}, 刘荣秀³, 韩烈保^{1*}

(1. 北京林业大学 高尔夫教育与研究中心, 北京 100083; 2. 湖南涉外经济学院 体育学院, 湖南 长沙 410205;
3. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了探讨草坪在地下滴灌条件下的土壤水分运移规律,通过在单滴头和网格滴头 2 种供水条件下,对田间草坪进行了地下滴灌的入渗试验研究。结果表明:在以单滴头供水条件下,灌水时间持续 1 h,土壤水分在离滴头水平距离 0~15 cm 内运移较快,土壤含水率变化迅速,45 min 能到达 15 cm 的距离,60 min 能到达 20 cm 的距离,90 min 后才能到达 30 cm 的距离。但在 20~30 cm 范围内土壤含水率变化较平缓;在以网格滴头供水条件下,滴头间存在水分叠加效应。在以 30 cm 边长的网格滴头对草坪土壤供水条件下,灌水时间持续 1 h,在相邻两滴头间 45°角的剖面上,0~15 cm 距离范围,90 min 后会产生土壤水分的叠加效应,土壤含水率骤然上升,能有效减少出现灌水不均匀与灌水盲区的概率。垂直于毛管向外的切面上土壤水分的叠加效应不明显。灌水结束后,土壤水分还会向含水率较低的区域运移,发生再分布,但变化非常平缓,且在灌水结束后 24 h 达到区域稳定。

关键词:草坪;地下滴灌;土壤含水率;土壤水分运移

中图分类号: S793.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2011)05-0059-07

Dynamics of Water Movement in Subsurface Soil of Drip Irrigated Lawn

HUANG Zhi-yong^{1,2}, LIU Rong-xiu³, HAN Lie-bao^{1*}

(1. Golf Education and Research Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Department of Physical Education, Hunan International Economics University, Changsha, Hunan 410205, China;
3. Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to understand the soil moisture migration rules of the lawn with subsurface drip irrigation (SDI), the infiltration experiment of SDI on the grass in the field was carried out by two water supply modes single and grid emitters. The results showed that under the water supply of single emitter, the soil moisture content changed quickly in horizontal direction when the irrigation lasted for 1 hour, the water could move 15 cm from the head of emitter within 45 min, 20 cm within 60 min, and 30 cm with 90 min. The rate of variation of soil water changed smoothly with the range of 20—30 cm. Under the water supply of grid emitters, superimposition effects were observed among the emitters. When the irrigation lasted for 1 hour by the grid emitters with the distance of 30 cm, the soil moisture content increased sharply ranged from 0—15 cm, superimposition effects appeared after 90 min. There was no obvious superimposition effect of soil moisture in perpendicular direction. After the irrigation, soil moisture would move to the area with the low moisture content, and the re-distribution was formed with very gentle changes, and these areas became stable in 24 hours after irrigation.

Key words: lawn; subsurface drip irrigation; soil moisture content; soil water movement

收稿日期: 2011-05-19 修回日期: 2011-05-21
基金项目: 国家林业局林业科学技术推广项目—裸露坡面植被恢复综合技术示范推广(2011-31 号)。
作者简介: 黄志勇, 男, 讲师, 在读博士, 主要研究方向: 高尔夫球场设计、建造与管理。E-mail: hzy119110@sina.com
* 通讯作者: 韩烈保, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: hanliebao@163.com

地下滴灌(subsurface drip irrigation,SDI)是在滴灌技术(drip irrigation,DI)基础上发展而成的一种新型高效节水灌溉技术,它通过地埋管道系统及安装在毛管上的灌水器,将有压水或者水肥药的混合液缓慢渗入根系土壤,再借助毛细管作用和重力扩散到整个植物根系的灌溉技术^[1]。草坪是一种密植、浅根系并且株体低矮的地被植物,将 SDI 技术应用于草坪,最主要的优点在于避免灌溉设施和过程对草坪上文体活动的干扰。同时与喷灌、漫灌等其他灌溉方式相比,SDI 系统对土壤结构扰动较小有利于保持根层疏松通透的环境条件,并可减少土面蒸发损失,故该技术具有明显节水增产效益。此外,SDI 系统地埋后还具有提高作物产量和品质、施肥施药和管理方便、利用率高、管材抗老化性能增强、使用寿命长、减少污染、不易丢失或人为损坏等优点^[2-4]。近年来该项技术主要在各类果树^[5-6]、蔬菜^[7-8]、部分大田作物以及其他高产值作物等有较大间距的作物上使用^[9-13],但在草坪等密生植物的应用研究少^[2-3,15,17]。由于水资源短缺,节水灌溉成为降低城市草坪养护成本的重要措施,因此发展城市绿地、草坪地下滴灌具有重要的现实意义。

草坪 SDI 系统的设计计算非常复杂,其中滴头流量、埋深、滴头间距是 SDI 的重要技术参数,而确定这些参数的重要依据是滴灌系统土壤水分运移的规律^[4]。本研究通过运用烘干法以土壤含水率为指标,在单滴头和网格滴头 2 种供水条件下,对田间草坪进行了地下滴灌的入渗试验。旨在为了探讨草坪地下滴灌条件下土壤水分运移规律,为未来草坪地

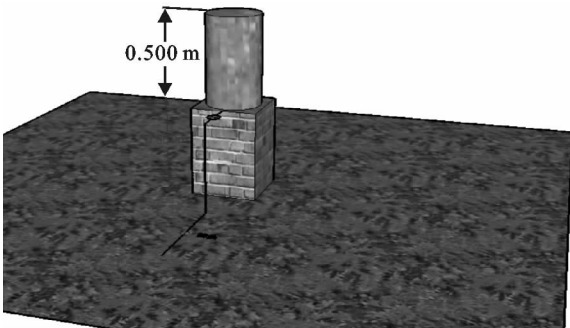


图 1 单滴头试验装置示意

Fig. 1 Sketch map of the experimental apparatus with the water supply by single emitter

1.2.1 单滴头条件下土壤水分运移试验 在草坪试验地选择一块 3 m×3 m 平整的正方形小区(图 1),将 PVC 桶放在墙体上并灌满水。用专用的打孔器将滴头安装到毛管中,连接好球阀和 PVC 桶。首先重复 3 次测量滴头流量,擦净后将滴头埋入深度

下滴灌系统装置滴头间距、毛管间距以及管网设计等提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于北京市昌平区白浮村北京林业大学草业科学试验站。地理坐标为 116°14′52″E、40°10′34″N,海拔约 55 m,属暖温带半湿润大陆型季风气候。年平均气温 11℃,1 月平均气温-8~4℃,7 月平均气温 23~26℃,全年无霜期 160~180 d(4 月中旬-10 月中旬);年平均降水量 550 mm,降水季节分布很不均匀,夏季降水占全年的 74%。总的气候特点是春旱多风、夏热多雨、冬寒少雪。草坪土壤质地为砂质土壤,容重为 1.55 g·cm⁻³,较为贫瘠。试验地地势平坦、开阔,无遮荫,光照、通风条件良好。

1.2 试验材料与方法

本试验包括单滴头条件和网格条件下土壤水分运移 2 个试验。2 个试验的地点和材料完全一样。试验材料由以色列 PLASTRO 公司提供的流量为 2.3 L·h⁻¹的 katif 压力补偿式滴头,毛管直径 16 mm,壁厚 1.2 mm,工作最大压力为 0.4 MPa,16 mm 的 PE 球阀,用自制恒水头 PVC 桶作为灌水水源,桶的直径 0.3 m,桶高 0.5 m,PVC 桶放在由砖块砌成的长、宽、高分别为 0.3、0.3、0.5 m 墙体上。滴头埋藏深度上,参照部分研究者的研究成果^[2-3]认为,草坪滴灌系统最合理埋藏深度为 15 cm,2 个试验的灌水器统一埋放于地表下 15 cm(图 1、图 2)。

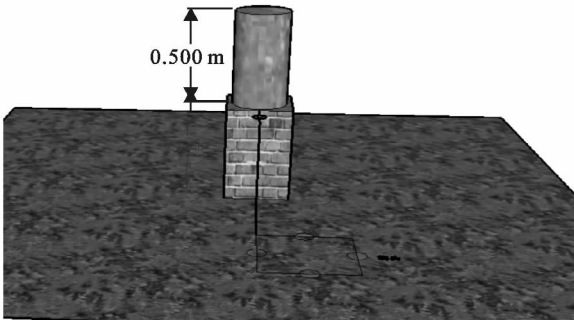


图 2 网格滴头试验装置示意

Fig. 2 Sketch map of the experimental apparatus with the water supply by grid emitters

为 15 cm 的土壤中。48 h 后进行灌水试验。试验前对该地进行土壤质地测量,并测量 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30 cm 土壤层的初始含水率。根据预备试验的效果和土壤质地情况,灌水持续时间设置为 1 h。在灌水过程中始终保持

PVC 桶的恒水位状态。滴灌过程中和灌水后用自制土钻分别对不同时刻距滴头 5、10、15、20、25、30 cm,土壤深度分别为 5、10、15、20、25、30 cm 的点进行取样。由于地下滴灌灌水过程属于点源入渗,假设土壤是各向同质均一,水分在土壤中运移是以滴头为中心的对称图形^[18]。因此单滴头条件下土壤取点时间和方向如图 3 所示。采集土样用烘干法经 105℃下烘干 10 h 后称重测量实际土壤含水率。

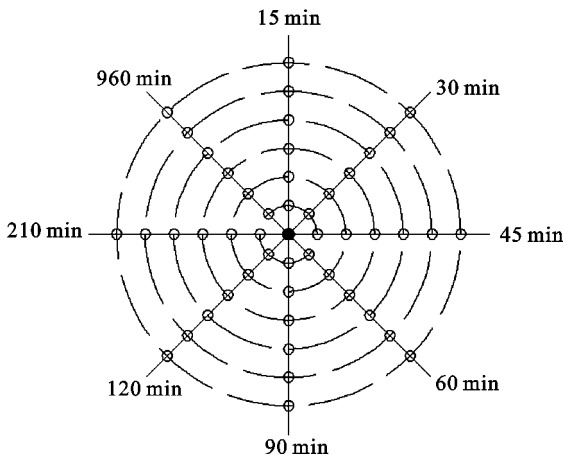


图 3 单滴头条件下土壤取点示意图

Fig. 3 Sketch map of the soil sampling under the water supply of single emitter

1.2.2 网格滴头条件下土壤水分运移试验 本试验的前期准备工作跟单滴头土壤水分运移试验一样,唯一不同的是由 4 个单滴头组成边长为 30 cm 正方形网格进行供水。网格条件下,4 个滴头同时灌水,随着灌水时间的持续,土壤水分向外运移,滴头之间的土壤水分有可能会引起水分的叠加作用,假设土壤是各向同质均一,理想情况下其叠加横切面示意图如图 4 所示。由于可能会有水分的叠加效应,不能像单滴头那样取点。但仍旧能找到土壤含水率在任何时刻都相等的直线。本试验选择具有代表性的 2 种直线。一种是与各毛管成 45°角,经过滴头向外的射线,这样的射线有 8 条,这些射线在网格滴头的土壤水分叠加范围之内,研究灌水过程和灌水后土壤水分的再分布情况。另一种是垂直于各边毛管,经过滴头向外的射线,这样的射线有 4 条,灌水结束后开始取点,主要研究灌水后的土壤水分再分布情况(图 5)。用烘干法测量土壤含水率。

1.2.3 数据分析 数据统计和绘图均采用 Excel 2007 软件。

2 结果与分析

2.1 单滴头条件下土壤水分的运移

2.1.1 滴头流量与土壤初始含水率测算 滴头埋

设前,单滴头的流量测量结果如表 1,经过 3 次重复测量单滴头流量平均值为 $2.66 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$;土壤初始含水率如表 2 所示,从 0~30 cm 的土壤呈现先递增然后递减的整体态势,其中 15~20 cm 的土壤层中含水率最高,达到 12.68%。

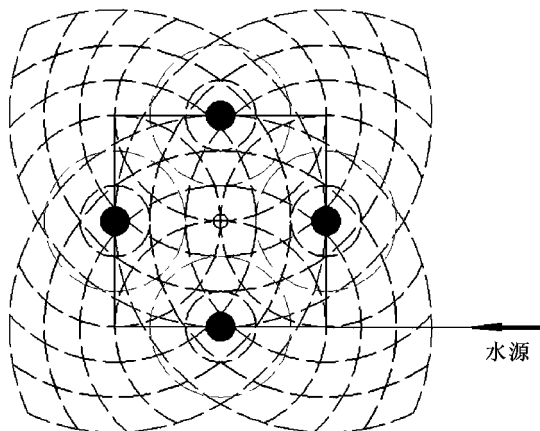


图 4 网格条件下土壤水分叠加横切面示意图

Fig. 4 Sketch map of the soil moisture superposition cross-section

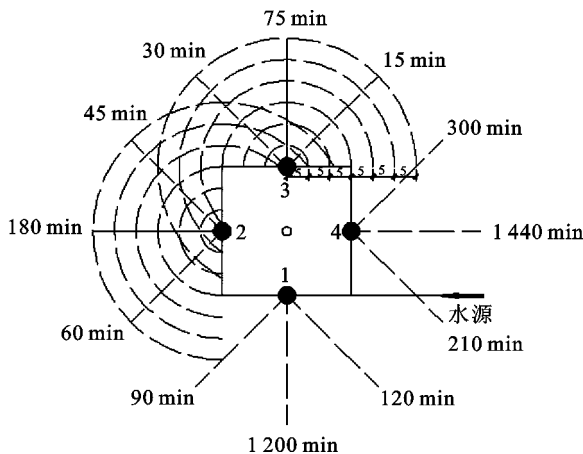


图 5 网格条件下土壤取点示意图

Fig. 5 Sketch map of the soil sampling under the water supply of grid emitters

表 1 滴头流量测量结果

Table 1 Results of the emitter flow

| 重复次数 | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| 流量/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$) | 2.67 | 2.64 | 2.68 | 2.66 |

2.1.2 单滴头条件下土壤水分运移规律 由图 6-(a)可以看出,由于离滴头水平距离只有 5 cm,滴头埋深 15 cm,5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm 这 3 层土壤层在灌水后含水率开始增加,且增加的速率非常大,表明湿润峰已经到达这些土层。而 0~5 cm、25~30 cm 土壤含水率没有增加,湿润峰并未到达这些土层。灌水 30 min 后,所有土层的含水率都增加,一直到 60 min 灌水结束时停止增加,但灌水

停止后水分继续向含水率低的区域运移,含水率开始下降,到 960 min 时,含水率趋于稳定。

表 2 土壤初始含水率

Table 2 Initial moisture content of the soil

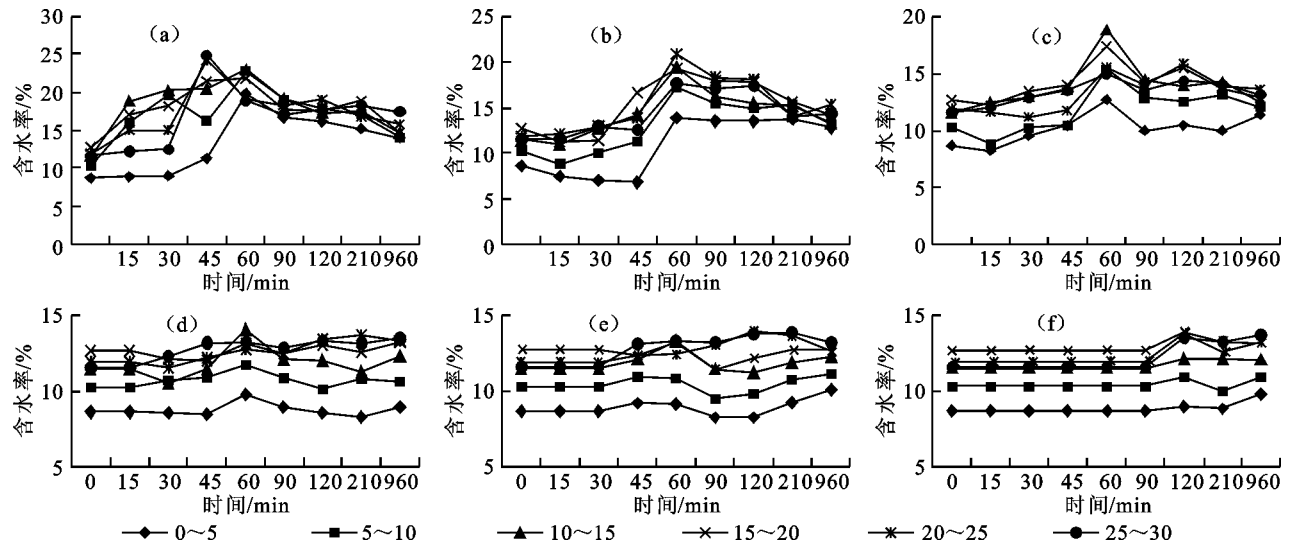
| 土层深度/cm | 0~5 | 5~10 | 10~15 | 15~20 | 20~25 | 25~30 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 含水率/% | 8.66 | 10.27 | 11.51 | 12.68 | 11.9 | 11.58 |

由图 6-(b)可以看出,灌水 30 min 后含水率开始增加,但增加的速率很平缓,表明湿润峰到达水平距离 10 cm 的剖面,45 min 后含水率增加迅速,到 60 min 灌水结束后含水率停止增加,水分继续向含水率低的区域运移,含水率开始下降,到 960 min 时,含水率趋于稳定。

由图 6-(c)可以看出,灌水 30~45 min 后含水率开始增加,但增加趋势平缓,湿润峰到达水平距离 15 cm 的剖面,45 min 后含水率增加迅速,到 60 min 灌水结束

后含水率停止增加,水分继续向含水率低区域运移,含水率开始下降,到 960 min 时,含水率趋于稳定。

由图 6(d)~图 6(f)可以看出,45 min 时湿润峰到达水平距离 20 cm,60 min 到达 25 cm,90 min 到达 30 cm,含水率增加,但增加趋势平缓,由于距离滴头较远,含水率增加没有像 0~15 cm 那样增加迅速。由于是在室外试验,960 min 最后一次取样隔了一夜,露水作用大于土壤水分的再分布,使得 0~10 cm 土层的含水率大于 210 min 时的含水率。



(a)水平距离 5 cm;(b)水平距离 10 cm;(c)水平距离 15 cm;(d)水平距离 20 cm;(e)水平距离 25 cm;(f)水平距离 30 cm

图 6 单滴头条件下水平方向距离滴头 0~30 cm 处不同土层深度含水率变化

Fig. 6 Moisture content variations different soil depth under single emitter in horizontal distance 0—30 cm

2.2 网格滴头条件下土壤水分运移

2.2.1 网格滴头流量与土壤初始含水率测算 网格滴头埋设前,4 个滴头的流量测量结果如表 3,经过 3 次重复测量 4 个单滴头流量平均值为 2.57 L · h⁻¹;由于进行该试验前一个星期下过一场大雨,所以与单滴头试验的土壤初始含水率有较大差异。

具体的土壤初始含水率如表 4 所示。

表 3 网格埋设前滴头的流量

Table 3 Flow of grid emmitter irrigation

| 网格边长 | 流量/(L · h ⁻¹) | | | | 均值 |
|-------|---------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 30 cm | 2.58 | 2.55 | 2.54 | 2.60 | 2.57 |

表 4 网格边长条件下土壤初始含水率

Table 4 Initial moisture content of the soil with grid emitter irrigation

| 土层深度/cm | 0~5 | 5~10 | 10~15 | 15~20 | 20~25 | 25~30 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 含水率/% | 13.69 | 13.19 | 13.73 | 14.23 | 15.29 | 15.99 |

2.2.2 网格滴头条件下土壤水分的运移 与毛管成 45°角,经过滴头向外的射线的土壤含水率如图 7

(a)~图 7(f)所示。由图 7(a)~图 7(c)可以看出,在水平距离 0~15 cm 范围内,同一条曲线分别在

30 min 和 90 min 时存在 2 个波峰,在 30 min 时表明湿润峰已经到达该点,在 90 min 时很有可能是因为和相邻滴头的土壤水分产生叠加效应,使得土壤含水率骤然增加。90 min 以后土壤含水率开始下降,但变化平缓。

由图 7(d)~图 7(f)可以看出,60 min 时,湿润峰开始到达水平距离为 20 cm 的位置,90 min 时到达水平距离 30 cm 的位置,在 120 min 时出现了波峰,有可能是水分的叠加效应所产生的。120 min 后土壤含水率开始下降。

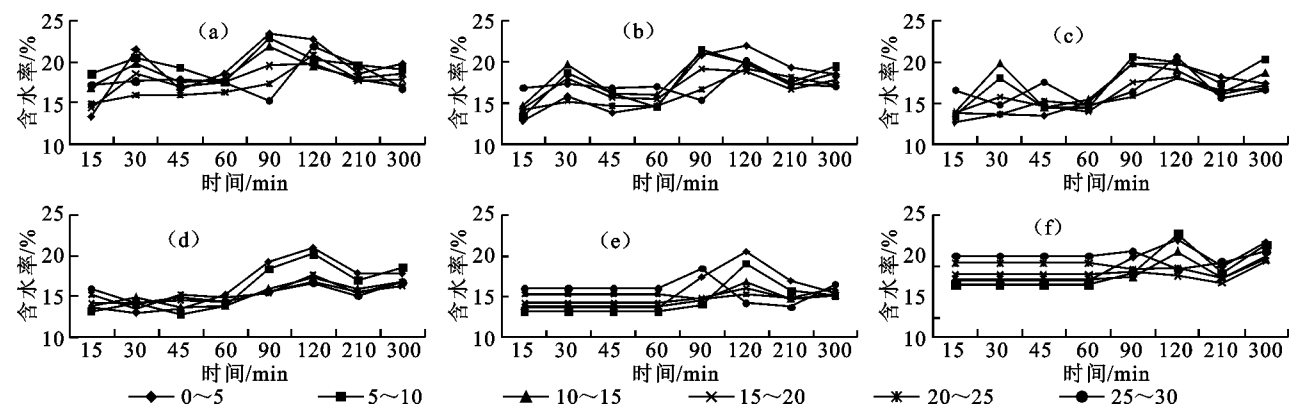


图 7 网格滴头条件下水平方向距离滴头 0~30 cm 处不同土层深度含水率变化

Fig. 7 Moisture content variation of different soil depths under grid emitter irrigation in horizontal distance 0~30 cm

垂直于毛管,经过滴头向外射线的土壤含水率如图 8(a)~图 8(f)所示。从图 8 可以看出,灌水结束后,这些区域内土壤含水率变化幅度不大,但土壤

水分还能继续运移,土壤含水率高的区域向土壤含水率低的区域运移,土壤湿润范围进一步扩大。灌溉停止 16 h 后土壤水分运动逐渐趋于稳定。

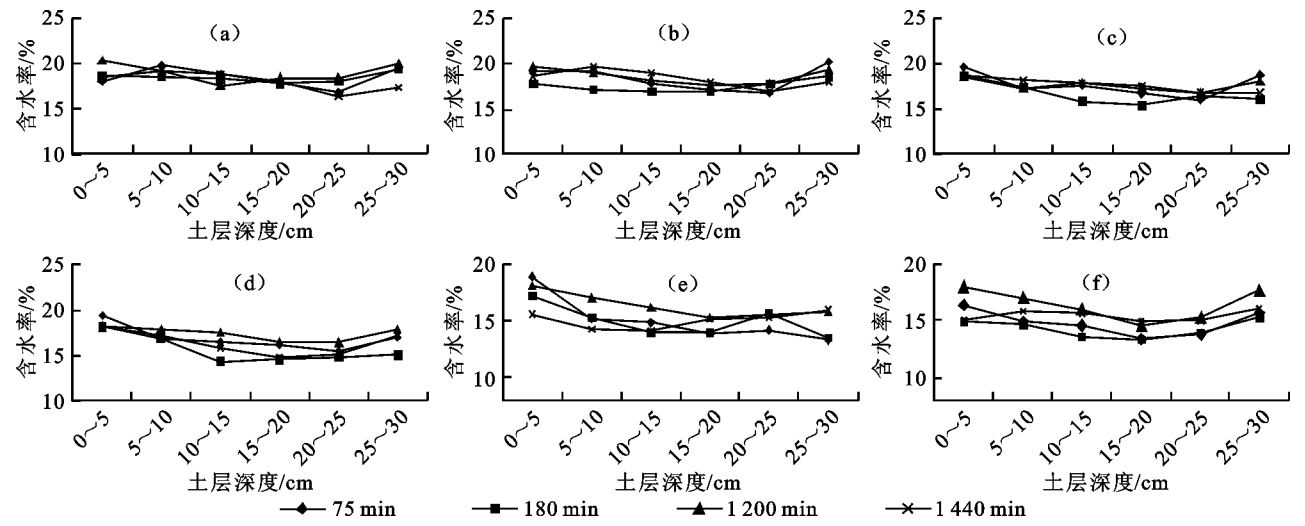


图 8 网格滴头条件下灌水结束后垂直于毛管方向 0~30 cm 处不同土层深度含水率变化

Fig. 8 Moisture content variation of different soil depths after watering in vertical direction of capillary tubes under grid drop emitter irrigation in horizontal distance 0~30 cm

3 结论与讨论

3.1 结论

在以单滴头供水条件下,灌水时间持续 1 h,在充分保证垂直方向上 0~30 cm 所有草坪土层都有明显含水率增加的前提下,土壤水分在离滴头水平距离 0~15 cm 内运移较快,土壤含水率变化迅速,

45 min 能到达 15 cm 的距离。60 min 能到达 20 cm 的距离。90 min 后才能到达 30 cm 的距离。但在 20~30 cm 范围内土壤含水率变化较平缓。

30 cm 边长的网格滴头草坪土壤条件下,灌水时间持续 1 h,在相邻两滴头间 45°角的剖面上,0~15 cm 距离范围,90 min 后会产生土壤水分的叠加效应,土壤含水率骤然上升。垂直于毛管向外的切

面上土壤水分的叠加效应不明显。灌水结束后,土壤水分还会向含水率较低的区域运移,产生再分布,但变化非常平缓,在灌水结束 24 h 趋于稳定。

3.2 讨论

与常规由单滴头组成的线性布置的草坪地下滴灌系统相比,网格滴头布置使各滴头在草坪根系中的分布更加均匀,整个系统纵横贯通,水流通道多,相邻滴头间存在土壤水分的叠加效应。从而可以有效减少灌溉不均匀与灌溉盲区的概率,提高灌溉效率。通过本试验的研究,建议实践中草坪地下滴灌系统滴头的埋藏深度为 15 cm 左右,适宜于采用网格布置,单位管网以边长不超过 30 cm 为宜,边长在 10~20 cm 的管网布置可以在 1 h 灌溉时间内实现良好的灌溉均匀度。

由于试验条件的原因本试验只设置了一个压力梯度,且没有重复试验,试验结果有一定的误差。在进行网格滴灌的土壤水分运移试验时,为研究水分的叠加效应,只设置了毛管边长为 30 cm 的网格,并未设置边长梯度,这些方面还有待进一步试验研究。

参考文献

[1] 作峰,宰松梅,丛佩娟. 国内外地下滴灌研究及应用现状[J]. 灌水技术, 2004,25(4):25-28.

[2] 庄千燕,苏德荣,宋雪枫,等. 滴头埋设深度对土壤水分运移及草坪草生长的影响[J]. 草地学报,2010,18(3):435-440.

ZHUANG Q Y, SU D R, SONG X F, *et al.* Effect of emitter depth of underground drip irrigation system on soil water transportation and turfgrass growth[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(3):435-440. (in Chinese)

[3] 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.

CHEN P, SU D R. Effects of subsurface drip irrigation on soil moisture and underground root distribution of turfgrass[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6):48-50. (in Chinese)

[4] 李红,罗金耀. 地下滴灌条件下土壤水分研究概况[J]. 节水灌溉, 2005(3):26-28.

LI H, LUO J Y. A review of research on soil-water movement in subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2005 (3):26-28. (in Chinese)

[5] 马孝义,康绍忠,王凤翔,等. 果树地下滴灌灌水技术田间试验研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(1):57-61.

MA X Y, KANG S Z, WANG F X, *et al.* Field test of apple orchard subsurface irrigation techniques[J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 2000, 28 (1): 57-61. (in Chinese)

[6] 田义,张玉龙,虞娜,等. 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]. 干旱地区农业研究,2006, 24(5):88-90.

TIAN Y, ZHANG Y L, YU N, *et al.* Effect of different low irrigation limit on growth, quality and yield of tomato under subsurface drip irrigation in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(5):88-90. (in Chinese)

[7] 杨丽娟,张玉龙,须晖. 棚室蔬菜生产中滴灌技术研究进展[J]. 农业工程学报,2003,19(6):264-267.

YANG L J, ZHANG Y L, XU H. Advance of study on irrigation techniques in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6):264-267. (in Chinese)

[8] 谢恒星,蔡焕杰,张振华. 间接地下滴灌对温室甜瓜植株性状、品质和产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):50-54.

XIE H X, CAI H J, ZHANG Z H. Effects of indirect subsurface irrigation on plant physiological characteristics, quality and yield of greenhouse muskmelon[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3):50-54. (in Chinese)

[9] 吕谋超,冯俊杰,翟国亮. 地下滴灌下玉米的初步试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(1):67-72.

LV M C, FENG J J, ZHAI G L. Preliminary test of soil water influence on root system and yield of summer corn in subsurface drip irrigation[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1):67-72. (in Chinese)

[10] 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等. 根区交替地下滴灌对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(1):79-83.

HUANG Z D, QI X B, FAN X Y, *et al.* Effects of alternate partial root-zone subsurface drip irrigation on potato yield and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 19(1):67-72. (in Chinese)

[11] 席本野,贾黎明,王烨,等. 地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟[J]. 应用生态学报,2011,22(1):21-28.

XI B Y, JIA L M, WANG Y, *et al.* Simulation of soil water dynamics in triploid *Populus tomentosa* root zone under subsurface drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1):21-28. (in Chinese)

[12] 韦艳葵,贾黎明,王玲,等. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林木根系生长特性[J]. 北京林大学学报,2007,29(2):34-40.

WEI Y K, JIA L M, WANG L, *et al.* Characteristics of root growth in fast-growing and high-yield poplar plantations under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2):34-40. (in Chinese)

[13] 范永申,作峰,张银炎,等. 地下滴灌条件下棉花土壤水分运移田间试验研究[J]. 灌溉排水学报,2007,26(4):1-3.

FAN Y S, WU F, ZHANG Y Y, *et al.* Changing of soil moisture in cotton field under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(4):1-3. (in Chinese)

[14] 朱友娟,郑德明,姜益娟. 新疆棉田地下滴灌方式下土壤水分运移变化规律研究[J]. 节水灌溉,2007(5):23-25.

ZHU Y J, ZHENG D M, JIANG Y J. Study on change rule of soil moisture movement under subsurface drip irrigation in cotton field of Xinjiang autonomous region[J]. Water Saving

Irrigation, 2007(5):23-25. (in Chinese)

[15] 程维新,康跃虎. 北京地区草坪耗水量测定方法及需水量浅析[J]. 节水灌溉, 2002(5):12-14.

CHEN W X, KANG Y H. Measuring method of water consumption and water requirement of lawn in Beijing area[J]. Water Saving Irrigation, 2002(5):12-14. (in Chinese)

[16] 孟季蒙,李卫军,陈金炜,等. 地下滴灌不同水量与播种方式下苜蓿种子产量构成因素的相关性分析[J]. 新疆农业科学, 2010,47(6):1252-1256.

MENG J M, LI W J, CHEN J W, *et al.* Effect of subsurface drip irrigation on the yield and components of alfalfa seeds[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010,47(6):1252-1256. (in Chinese)

[17] 何华,康绍忠,曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根管生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001,11(6):31-35.

HE H, KANG S Z, CAO H X. Effect of lateral depth on root and seedling growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001,11(6):31-35. (in Chinese)

[18] 李道西,罗金耀,彭世彰. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004,23(4):26-28.

LI D X, LUO J Y, PENG S Z. Laboratory experimental study on soil-water movement of subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004,23(4):26-28. (in Chinese)

[19] 苏德荣,田媛. 微灌理论与实践[M]. 兰州:甘肃教育出版社, 1999:1-2.

[20] 陈小三,王和平,程希. 地下点源滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 节水灌溉, 2011(1):40-42.

CHEN X S, WANG H P, CHEN X. Laboratory test of soil water movement under subsurface drip irrigation with point source[J]. Water Saving Irrigation, 2011(1):40-42. (in Chinese)

(上接第 45 页)

[16] 许桂芳. 2 种过路黄抗旱生理特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 12-14.

XU G F. Physiological process of drought resistance of two *Lysimachia* species[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5): 12-14. (in Chinese)

[17] 刘红云,梁宗锁,刘淑明,等. 持续干旱及复水对杜仲幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 55-59.

LIU H Y, LIANG Z S, LIU S M, *et al.* Effect of progressive drying and rewatering on protective enzyme activities and osmoregulatory molecules in leaves of *Eucommia ulmoides* seedling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 55-59(in Chinese).

[18] 魏媛,喻理飞. 一年生构树幼苗对水分胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(4):40-44.

WEI Y, YU L F. Physiological response of one-year-old *Broussonetia Papyrifera* seedlings to water stress [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(4):40-44. (in Chinese)

[19] 单长卷,梁宗锁. 土壤干旱对冬小麦幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 38-41.

SHAN C J, LIANG Z S. Effects of soil drought on root growth and physiological characteristics of winter wheat seedlings [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 38-41. (in Chinese)

[20] 刘遵春,包东娥. 干旱胁迫对莲座期白菜生理生化特性的影响及其抗旱性综合评价[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(6): 16-20.

LIU Z C, BAO D E. The study of drought stress on physiological and biochemical characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in Chinese cabbages in rosette stage[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2008, 31(6): 16-20. (in Chinese)