

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.037

水肥一体化下不同滴灌带配置对玉米产量的影响

王睿¹ 李鹏¹ 王文娥²

(1. 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对水肥一体化下不同滴灌带配置方式对作物产量的影响, 结合实际探究了当铺设 50 m 长滴灌带、设置 6 种不同首部压力时, 毛管首、中、尾部的土壤含水率、干物质质量积累量对作物产量的影响。结果表明: 滴灌带类型差异使得土壤的平均含水率在生育期内变化规律有所差异, 滴头采用内镶贴片式 (NO. 30) 时土壤含水率变化规律呈较明显的先下降后上升趋势, 且随着滴头流量的增大, 在全生育期土壤含水率变化越平缓; 滴头采用侧翼迷宫式 (LO. 15) 时土壤含水率变化趋势平缓, 且随着滴头流量的增大, 在全生育期土壤含水率变化越显著。LO. 15 下全生育期土壤含水率均满足作物生长的需求, 可以为作物提供充足水分; 流入滴灌带的肥液流速越低、长度越长, 附着在管壁的肥料质量越多, 尾部作物的肥料利用率越低, 致使养分吸收少, 作物产量降低。对不同处理下毛管的首、中、尾部产量均匀性进行分析表明, 随着滴灌带长度的增加, NO. 30 的作物产量均匀性逐渐降低, LO. 15 的作物产量均匀性逐渐上升, 故不同滴头流量对沿滴灌带长度方向的产量均匀性有一定影响。

关键词: 玉米; 产量; 土壤含水率; 干物质质量; 滴灌带

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0327-07

Effects of Different Drip Irrigation Belts Distributions on Maize Yield under Water and Fertilizer Integration

WANG Rui¹ LI Peng¹ WANG Wene²

(1. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of soil moisture content, dry mass accumulation and soil moisture content of capillary head, middle and tail of drip irrigation belt on crop yield under six different head pressures were investigated by laying 50m long drip irrigation belt. The results showed that the variation of average soil moisture content during the growth period was different due to the difference of drip irrigation zone type. The variation law of soil moisture content of NO. 30 showed obvious trend of decreasing at first and then rising, and with the increase of dripper flow, the soil moisture content of NO. 30 was increased. The change of soil moisture content was smooth in the whole growth period. The changing trend of LO. 15 soil moisture content was smooth, and with the increase of dripper flow, the soil moisture content was changed more significantly in the whole growing period. Under the condition of LO. 15, the soil moisture content in the whole growing period can meet the needs of crop growth, and it can provide sufficient water for crops. The lower the flow velocity and the longer the length were, the more the fertilizer was attached to the belt wall, the lower the fertilizer utilization efficiency of the tail crop was, and the less the nutrient absorption was, the lower the crop yield was. The yield uniformity of the head, middle and tail of capillary tube under different treatments was analyzed. It was found that with the increase of length of drip irrigation belt, the uniformity of crop yield of NO. 30 was decreased gradually, and the uniformity of crop yield was

收稿日期: 2018-11-14 修回日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400203)、陕西省技术创新引导专项基金项目(2017CGZH-HJ-06)和陕西省创新人才推进计划项目(2018TD-037)

作者简介: 王睿(1992—),女,博士生,主要从事节水灌溉新技术研究,E-mail: 289335390@qq.com

通信作者: 王文娥(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉新技术研究,E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

increased at L0.15. Therefore, different drip discharges had certain effect on the yield uniformity along the length of drip irrigation belt.

Key words: maize; yield; soil water content; dry matter mass; drip irrigation belt

0 引言

在滴灌系统设备中,滴灌带是连接首部枢纽与作物的桥梁。灌水均匀系数是滴灌系统设计和衡量系统灌水质量的重要指标,影响灌水均匀系数的因素很多,如灌水器工作压力变化、灌水器制造偏差、堵塞情况、水温变化、微地形变化及滴灌带长度等^[1]。席奇亮等^[2]比较了4种滴灌带铺设长度和4种进水压力交互作用下的灌水均匀度,认为内嵌式滴灌带的灌水均匀度较薄壁式滴灌带更好,且更适合于较长距离铺设使用。马晓鹏等^[3]对滴灌带灌水均匀系数影响规律进行探究,认为0°坡度低压条件下、滴灌带长度较短(60~120 m)时,随着滴灌带长度的增加,滴灌带流量成为影响滴灌带灌水均匀系数的主要因素。罗春艳^[4]研究发现,滴灌带进口口的压力对灌水均匀度产生一定影响,随着进口压力的增加,滴头灌水均匀度呈上升趋势。提高灌水均匀度目的在于提高作物的品质和产量,有学者从滴灌带配置方式的角度研究对作物的影响。孔繁宇等^[5]设置不同滴灌带类型、不同铺设长度进行试验,结果表明,适合于铺设100 m长的3种滴灌带,即易润、耐特菲姆(厚、薄)3种,其滴头流量分别为1.24、1.65、1.25 L/h。李波^[6]通过研究不同滴灌带类型的流量变化情况、玉米的均值产量以及均匀系数对灌水均匀性的影响,发现滴灌均匀度对作物产量和均匀度系数影响不大,但对作物的千粒质量、百粒质量影响较显著。王雪苗等^[7]研究了不同灌水处理、不同滴灌带配置方式对玉米农田生产力的影响,结果表明,全生育期内对玉米叶面积、叶片光合势影响显著的是灌水处理,灌水定额为450 m³/hm²时,铺设方式三行两管更有利于玉米生长及产量的增加。

滴灌系统首部设备与滴灌带的配合及运行模式直接影响系统的灌水施肥均匀度和运行成本。本文拟用比例式施肥泵配合两种滴灌带,采用3种不同施肥比例及3种首部压力,在甘肃省石羊河流域进行灌溉施肥试验,通过分析不同首部压力下滴灌带沿程流量、土壤含水率及玉米农田生产力的差异,优化滴灌系统设备配置。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本试验于2017年5—9月在甘肃省石羊河生态

节水试验站进行。该试验站地处腾格里沙漠边缘,平均海拔1581 m,干旱指数15~25。年平均降雨量160 mm,年平均蒸发量2000 mm以上,属于典型的干旱缺水地区。试验站水源为井水,经砂石过滤器后通过管道输送至试验地。水中主要含有碳酸氢根离子、硫酸氢根离子及氯离子等阴离子,钙离子、钾离子及镁离子等阳离子。pH值8.0,矿化度510 g/L,总硬度0.25 g/L,为中性偏弱碱性淡水,水质微硬。土壤类型属于粉砂质粘壤土,0~100 cm土层土壤容重1.52 g/cm³,平均田间持水率为19.3%。

1.2 大田试验布置

试验采用膜下滴灌水肥一体化灌溉技术,滴灌系统包括施肥装置、过滤设备及灌水器。其中施肥装置采用比例式施肥泵,可调节施肥比例范围1%~4%;采用网式、叠片式120目(0.13 μm)过滤器;滴头采用内镶贴片式(N0.30,滴头间距S=0.3 m)和侧翼迷宫式滴灌带(L0.15,滴头间距S=0.15 m),膜下滴灌铺设方法采用一膜单管双行种植方式,膜宽0.12 m。供试作物为“先玉335”玉米,采用穴播机进行播种,株距0.25 m,行距0.4 m。将整套滴灌系统布置于长110 m、宽22 m(0.25 hm²)的大田中,将其划分为4行2列共8个小区(50 m×3.6 m),每个小区布设1条支管、3条毛管(长50 m),其中2条毛管首部分别安装网式、叠片式过滤器。为了防止侧翼迷宫式滴灌带因管壁较薄而发生破损,将铺设L0.15的首部压力设置为0.04、0.05、0.06 MPa,小区编号F、G、H;将铺设N0.30的首部压力设置为0.08、0.09、0.10 MPa,小区编号B、C、D。以上6个小区进行施肥处理,其余2个小区分别铺设N0.30、L0.15作为清水对照组,小区编号A及E。单个小区滴灌系统布置见图1,管道上设有量程范围为0~0.25 MPa的精密数显压力表(Y180型,杭州米科传感技术有限公司)、毛管首部设有超声波流量计(测量精度±1%)等。

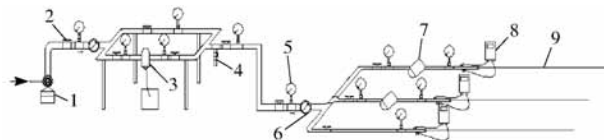


图1 小区大田滴管设备布置图

Fig. 1 Field experiment layout for drip irrigation system

1. 水泵 2. 阀门 3. 比例式施肥泵 4. 取水口 5. 精密压力表
6. 水表 7. 过滤器 8. 流量计 9. 滴灌带

1.3 试验设计

为保证各小区灌水量一致,通过水表计量,达到灌溉水量时关闭小区首部阀门即可,而各条毛管流量由流量计计量;过滤器水头损失(m)由其两端压力表差值换算(0.01 MPa 换算为 1 m)得到(图 1)。施肥泵施肥比例设置为 2%、3%、4%。

根据当地灌溉制度,于 2017 年 5 月 6 日进行播种,播种前将 30% 的尿素(N 280 kg/hm²)、全部硫酸钾(K₂O 90 kg/hm²)作基肥施入,全生育期内充分灌溉,9 月 24 日收获,生育期共计 142 d。在 6 月 6 日—9 月 9 日期间,共进行 9 次施肥(磷酸二胺(P₂O₅) 200 kg/hm²)且各小区灌溉制度相同,施加磷酸二胺量平均分配,则每次每个小区 0.8 kg。按照施肥比例不同,每个小区各比例各进行 3 次重复,共计 9 次。结合当地降雨等实时情况,灌水周期为 8~10 d;保证所施加的肥料均流入管道内,设定每次灌水时间为 20 min。各处理分别进行施肥,施肥完毕后统一进行清水灌溉,保证灌水量基本一致。

每次灌水前,采用干燥法进行土壤含水率的测定(每 20 cm 装袋),选取每个小区首、中及尾部呈“s”形采样;各生育期至少取一次植株样本测定作物的干物质积累量,每个小区沿滴灌带首、尾部各取 1 株植株,105℃ 杀青后 80℃ 干燥至恒定质量,称取干质量;成熟后,每个小区沿滴灌带长度方向选取首(5~15 m)、中(20~30 m)及尾部(35~45 m)各 3 个重复晾晒至含水率 14% 计产。

2 结果与分析

2.1 滴灌系统滴灌带水力性能

2.1.1 水力特性曲线

滴灌带灌水器流量取决于作用压力,在一定压力范围内,灌水器水力特性曲线可用流量-压力关系式进行描述^[8]。根据两种滴头的水力性能试验结果,分析了一定压力范围内滴头的流量-压力关系,绘制了滴灌管水力特性曲线,如图 2 所示(图中 q 为灌水器流量, h 为灌溉压力)。

2.1.2 沿滴灌带长度方向上的滴头流量变化

滴灌带属于沿程泄流有压管,由于沿程存在水

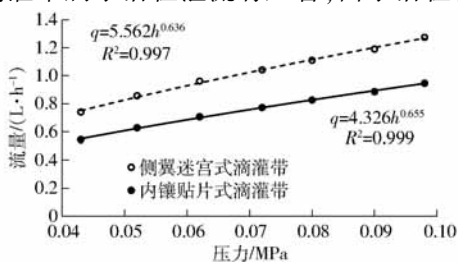


图 2 滴灌带灌水器压力-流量关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of drip emitter pressure and flow

头损失,管道内作用压力沿程下降;同时随着沿程流量逐渐减小,管径不变,单位长度上的水头损失逐渐减小,所以滴灌带沿程压力降低值逐渐减小,水力坡度逐渐变缓,作用压力不同导致灌水器流量、均匀系数不同,进一步影响到土壤的含水率及肥料分布,作物根区的土壤含水率直接影响作物对水分和肥料的吸收和利用。已知滴灌带末端压力,由图 2 滴灌带压力-流量公式 $q = 5.562h^{0.636}$ (NO. 30)、 $q = 4.326h^{0.655}$ (LO. 15) 得到该末端流量后,求得灌水器间管段水头损失,依次类推,由末孔逆流向上游递推求得沿程所有滴头流量^[9],图 3 为各小区在不同初始水头下沿滴灌带长度上的滴头流量变化。可看到,NO. 30 沿程流量比 LO. 15 沿程流量降低的趋势缓。LO. 15 沿程前 30 m 的滴头流量下降较快,后 20 m 趋于滴头流量趋于水平;而 NO. 30 滴头流量在前 15 m 有明显变化,后 35 m 趋于水平。原因是滴头孔距越小,产生的沿程总摩阻损失越大^[10],则流量下降越大。由于 LO. 15 滴头间距是 NO. 30 的 0.5 倍,LO. 15 沿程水头损失耗损严重,流量降幅大。

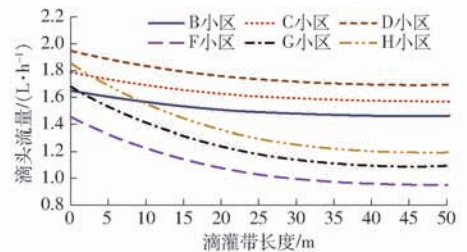


图 3 不同首部压力下滴灌带沿程滴头流量变化曲线

Fig. 3 Variation curves of drip flow along line of drip irrigation belt under different head pressures

表 1 为各小区滴灌带灌水均匀度及滴头平均流量的统计。由滴灌带沿程灌水器流量,根据灌水均匀度公式

$$C_u = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})}{n \bar{q}} \right] \times 100\%$$

式中 q_i ——第 i 个灌水器流量

\bar{q} ——灌水器平均流量

n ——滴头数量

求得不同压力下各小区(B~D、F~H)滴灌带灌水均匀度为 96.95%、96.74%、96.52% 和 94.71%、94.60%、94.53%。可以看出,随着首部压力的增大,灌水均匀度在逐渐降低,且关系显著($P < 0.05$)。不同压力下各小区滴头平均流量(B~D、F~H)为 1.50、1.63、1.76 L/h 及 1.09、1.25、1.37 L/h,小区滴头平均流量关系也显著($P < 0.05$)。因此,对两种滴灌带不同滴头流量和灌水均匀度下土壤的含水率、作物的生长指标及产量进行了分析。

表1 各小区滴灌带灌水均匀度及滴头平均流量

Tab.1 Statistics on uniformity of irrigation water and average drip flow rate of drip irrigation belt in each plot

小区 编号	压力/MPa		平均流量/ (L·h ⁻¹)	灌水均匀 度/%
	首部	尾部		
B	0.08	0.066	1.50 ^a	96.95 ^a
C	0.09	0.074	1.63 ^b	96.74 ^b
D	0.10	0.083	1.76 ^c	96.52 ^c
F	0.04	0.021	1.09 ^d	94.71 ^d
G	0.05	0.026	1.25 ^e	94.60 ^e
H	0.06	0.031	1.37 ^f	94.53 ^f

注:同列不同小写字母表示各处理差异显著($P < 0.05$)。

2.2 膜下滴灌玉米各生育期内相关指标

2.2.1 全生育期不同滴头流量对土壤含水率的影响

试验过程中对各小区滴灌带首、中、尾部的土壤含水率进行全生育期观测,图4(图中B~D、F~H表示小区编号,1、2、3分别表示滴灌带的首、中、尾部,下同)为全生育期内60 cm土层土壤的平均含水率动态变化情况。滴灌带类型差异使得土壤的平均含水率在生育期内变化规律有所差异,N0.30土壤

含水率变化规律均呈较明显的先下降后上升趋势,且随着滴头流量的增大其变异系数依次降低,分别为23.3%、18.8%、12.6%,滴头流量越大,生育期土壤含水率变化越平稳;L0.15土壤含水率变化趋势平缓,且随着随着滴头流量的增大其变异系数依次升高,分别为12.2%、12.5%、14.6%,滴头流量越大,生育期土壤含水率变化越显著。拔节期—抽雄期(6月6日—7月10日)、抽雄期—灌浆期(7月11日—8月12日)阶段玉米需水量剧增,土壤含水率宜保持在田间持水率的80%左右^[12],即15.4%以上。得到全生育期N0.30土层(60 cm)平均含水率变化显著且呈先下降后上升趋势,作物需水时期含水率低于15.4%,因此不能为作物提供充足水分;全生育期L0.15土层(60 cm)平均含水率趋势稳定且保持在15%左右,认为可以为作物提供充足水分。灌浆期—成熟期(8月13日—9月17日),土壤含水率宜保持在田间持水率的60%^[11],即11.6%,N0.30、L0.15处理均满足作物适宜的土壤水分条件。

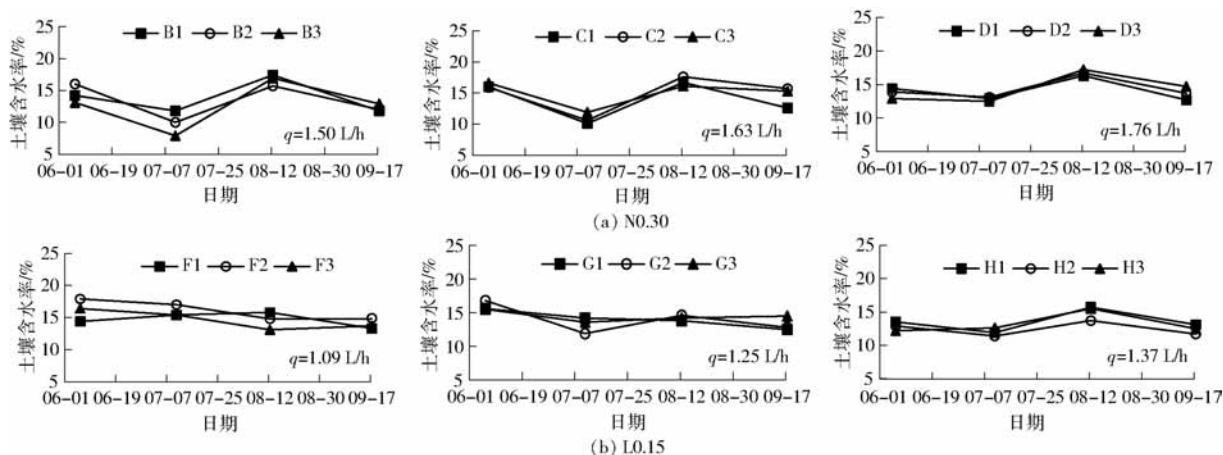


图4 玉米生育期内各小区滴灌带首、中、尾部土壤含水率动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil moisture content in head, middle and tail of drip irrigation belts of different plots during maize growth period

2.2.2 不同生育期玉米干物质质量动态变化

作物产量的形成与干物质积累过程密切相关,产量与最大干物质积累速率呈正相关,积累速率越大,产量越高^[12]。定量分析作物生产过程中干物质积累的动态变化是揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标的重要内容。图5(图中柱状表示干物质积累量,折线表示干物质积累速率)为玉米各生育期干物质积累量及干物质积累速率变化过程。

A、E小区为清水对照组,由图5可知,施加肥料可提高作物干物质积累量。由于滴灌带灌水均匀系数均在90%以上,影响作物干物质质量差异的原因有可能是作物吸收养分的差异,通过解剖滴灌带发现其管壁上附着有较多的白色粉末肥料,是由于施

肥输水过程中肥液中的肥料沉淀引起的。可以明显观测到附着在滴灌带管壁上的白色粉末有所不同,按由多到少依次为D、C、B和H、G、F,说明流速越低,附着在管壁的肥料越多,则尾部作物的肥料利用率越低。

两种滴灌带下的作物干物质积累速率曲线也有较直观差异,在灌浆期初(7月17日)L0.15的作物干物质积累速率涨幅较明显,此时正是玉米籽粒形成期(玉米灌浆期),需要保证充足养分和水分,是决定产量高低的关键。相比于N0.30,灌水器流量较小的L0.15更有利于作物产量的提高。

2.2.3 各小区产量沿滴灌带长度变化规律

各小区沿滴灌带长度上(首、中、尾部各取3个

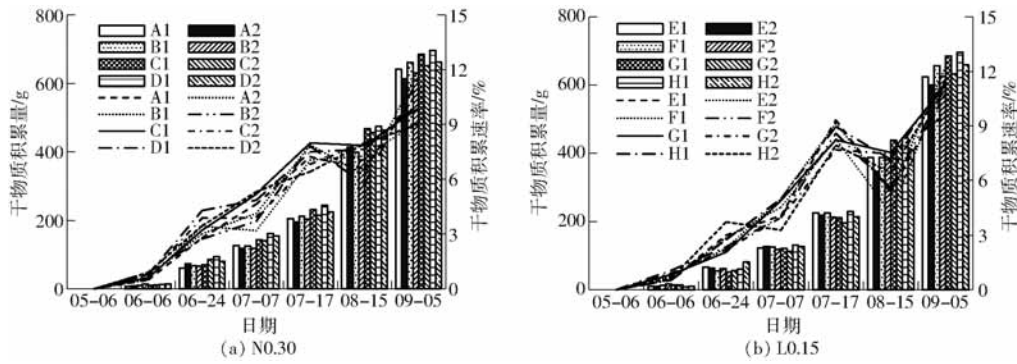


图5 干物质积累量和积累速率随时间的变化

Fig. 5 Changes of dry matter accumulation amount and speed with time

重复点)的产量分布情况见图6(图中折线表示两种滴灌带下首、中、尾部产量均值),并进行显著性分析得到各小区的作物产量均差异显著,且滴灌带尾部的作物产量较首、中部的作物产量来说总体呈下降趋势。2.2.2节中分析原因在于滴灌带越长,其滴头流量越小,附着在管壁的肥料越多,则肥液利用率就越低,因此滴灌带尾部的产量应该较低。再分别对不同滴灌带作物首、中、尾部的产量进行标准差分析,由大到小依次为 N0.30 首、中、尾部和 L0.15 中、尾、首部,N0.30 毛管的尾部产量标准差最低,说明不同滴头流量下毛管尾部(大于 30 m)的作物产量差异小,而 L0.15 毛管的中部产量标准差最高,说明不同滴头流量下毛管中部产量差异性大。再对不同处理下毛管的首、中、尾部产量均匀性进行分析,发现随着滴灌带长度的增加,N0.30 的作物产量均匀性逐渐降低,L0.15 的作物产量均匀性逐渐上升,故不同滴头流量对沿滴灌带长度方向的产量均匀性有一定影响。

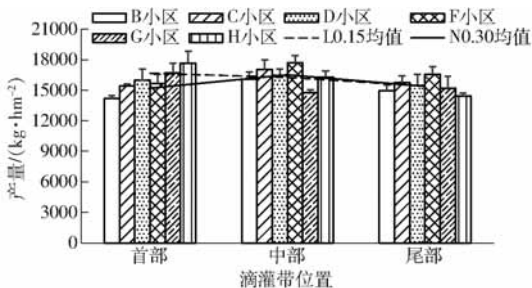


图6 各小区沿滴灌带长度上的产量

Fig. 6 Yield along length of drip irrigation belt in each plot

3 讨论

本文2.2.1节探讨了各生育期60 cm土层的土壤含水率平均值的动态变化,讨论生育期内土壤含水率变化对作物生长过程产生的影响。为进一步分析土层土壤水分分布下滴灌带首、中、尾部作物产量的差异,对各个生育期每层(10 cm)土壤含水率进行平均,如图7所示。发现随着滴头流量的增大,

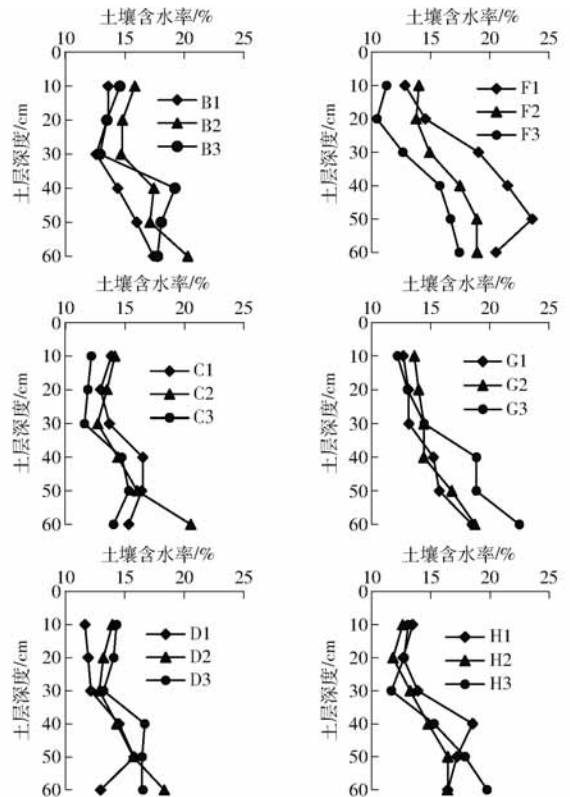


图7 各小区全生育期内每一层(60 cm)土壤平均含水率变化

Fig. 7 Changes of average soil water content of each plot in whole growth period

首、中、尾部的3条土壤平均含水率曲线逐渐重合,而其中N0.30的差异又比L0.15的差异小,分析原因,由于滴灌带间距不同,致使水平湿润半径重叠面积的差异,导致滴头下湿润体体积及土壤含水率不同,黄绵土(粉质壤土)的湿润体水平扩散距离 $R(t)$ 、垂直入渗距离 $H(t)$ 与入渗时间关系的表达式^[12]为 $R(t, q) = 2.409 1q^{0.348 2} t^{-0.004 5q+0.376}$ 、 $H(t, q) = 2.439 4q^{0.072 1} t^{0.408 5q^{0.080 7}}$ 。该试验选取土样与本试验土质相似,由此得到湿润半径 R 和湿润体体积 V 的关系式为 $V = 2n\pi R(t, q)^2 H(t, q)/3$,见表2。当L0.15滴头的水平湿润半径为7.5 cm时,表层湿润面积开始重叠(20 min),此时N0.30滴头水平湿润

表2 滴头不同平均流量下湿润体半径及体积

Tab.2 Radius and volume of wetting body under different average flow rates of emitter

小区 编号	滴头流量 $q/(L \cdot h^{-1})$	入渗时间 t/min	垂直湿润 半径 H/cm	水平湿润 半径 R/cm	湿润体体积 V/cm^3
B	1.50	20	8.89	8.38	1 740.27
		100	17.55	15.18	11 262.74
C	1.63	20	9.02	8.61	1 864.23
		100	17.88	15.59	12 097.02
D	1.76	20	9.15	8.83	1 986.06
		100	18.20	15.97	12 917.58
F	1.09	20	8.42	7.54	1 333.46
		100	16.32	13.71	8 533.64
G	1.25	20	8.62	7.89	1 495.31
		100	16.83	14.33	9 617.31
H	1.37	20	8.76	8.14	1 614.03
		100	17.19	14.75	10 414.09

半径小于 15 cm,湿润面积未发生重叠;当 NO. 30 滴头间水平湿润半径达到 15 cm 时,历时 100 min,此时 LO. 15 滴头水平湿润半径达到 14 cm,表层重叠面积几乎达到 50%。在两个点源扩散下的湿润体含水率相比在一个点源扩散下的湿润体含水率大,土壤含水率基数大,则蒸散发、降雨等相同环境下土

壤含水率变化幅度相对较低。结合 2.2.1 节不同时期土壤含水率变化趋势,解释了 NO. 30 的土壤含水率变异系数大,而 LO. 15 的土壤含水率变异系数小的原因。

4 结论

(1)滴灌带类型差异使得土壤的平均含水率在生育期内变化规律有所差异,NO. 30 土壤含水率变化规律呈较明显的先下降后上升趋势,且随着滴头流量的增大,在全生育期土壤含水率变化越平缓;LO. 15 土壤含水率变化趋势平缓,且随着滴头流量的增大,在全生育期土壤含水率变化越显著。LO. 15 下全生育期土壤含水率均满足作物生长的需求,可以为作物提供充足水分。

(2)流入滴灌带的肥液流速越低、长度越长,附着在管壁的肥料质量越多,尾部作物的肥料利用率越低,致使养分吸收少,作物产量降低。

(3)对不同处理下毛管的首、中、尾部产量均匀性进行分析表明,随着滴灌带长度的增加,NO. 30 的作物产量均匀性逐渐降低,LO. 15 的作物产量均匀性逐渐上升,故不同滴头流量对沿滴灌带长度方向的产量均匀性有一定影响。

参 考 文 献

- [1] 张国祥,吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J]. 农业工程学报,2005,21(9):27-29.
ZHANG Guoxiang, WU Pute. Determination of the design working head of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):27-29. (in Chinese)
- [2] 席奇亮,葛国锋,周方,等. 2种滴灌带灌水均匀度对铺设长度和进水压力的响应[J]. 灌溉排水学报,2018,37(3):78-83.
XI Qiliang, GE Guofeng, ZHOU Fang, et al. Responses of irrigation uniformity of two types of drip irrigation belts to inlet pressure and layin length[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3):78-83. (in Chinese)
- [3] 马晓鹏,龚时宏. 低压条件下滴灌带灌水均匀系数试验研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(4):6-10.
MA Xiaopeng, GONG Shihong. Uniformity coefficient of drip irrigation tapes under low operating pressure[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4):6-10. (in Chinese)
- [4] 罗春艳. 滴灌灌水均匀度影响因素及计算方法[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
LUO Chunyan. Influencing factors and calculation method of irrigation uniformity of drip irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [5] 孔繁宇,胡同军. 不同滴灌带和不同铺设间距的地下滴灌效果试验[J]. 中国农学通报,2004,20(6):331-333.
KONG Fanyu, HU Tongjun. Underground drip irrigation test in different drip zone with different lay intervals[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(6):331-333. (in Chinese)
- [6] 李波. 冲洗条件下过滤 300 目黄河水对滴灌带堵塞及玉米产量的影响[C]//2015 中阿博览会中国(宁夏)国际水资源高效利用论坛论文集,2015:8.
- [7] 王雪苗,安进强,雒天峰,等. 不同滴灌带配置方式对玉米干物质的积累及产量影响[J]. 水土保持研究,2015,22(6):122-125,133.
WANG Xuemiao, AN Jinqiang, LUO Tianfeng, et al. Effects of different drip irrigation configurations on dry matter accumulation and yield of corn[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6):122-125, 133. (in Chinese)
- [8] 王心阳. 迷宫流道灌水器抗堵塞性能影响因素研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
WANG Xinyang. Affecting factors about anti-clogging performance on emitter with labyrinth channel[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [9] 王亚林. 不同类型滴头毛管局部水头损失研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
WANG Yalin. The study of local head loss in different types of emitter laterals[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [10] 王凌. 沿程出流多孔流体分布管开孔率对出流均匀度的影响研究[D]. 石河子:石河子大学,2016.
WANG Ling. On the influence of flow uniformity along the porous fluid distribution pipe outflow opening rate[D]. Shihezi:

- Shihezi University, 2016. (in Chinese)
- [11] 崔晨韵,朱永华,吕海深. 淮北平原不同耕作措施对土壤水分及夏玉米产量的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 129-132.
CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LÜ Haishen. Impacts of different tillage methods on soil moisture and summer maize yield in Huaibei plain[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12):129-132. (in Chinese)
- [12] 赵颖娜,汪有科,马理辉,等. 不同流量对滴灌土壤湿润体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4):30-35.
ZHAO Yingna, WANG Youke, MA Lihui, et al. Study on effects of different dripper discharge on wetting soil characteristic of drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(4):30-35. (in Chinese)
- [13] 高鹏,简红忠,魏祥,等. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J]. 现代农业科技, 2012(8):250,257.
GAO Peng, JIAN Hongzhong, WEI Xiang, et al. The application status and development prospect of integrative water and fertilizer[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(8):250,257. (in Chinese)
- [14] 贾运岗,张富仓,李培岭. 大田滴灌条件下土壤水分运移规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6):15-18.
JIA Yungang, ZHANG Fucang, LI Peiling. Experimental research of soil water transport under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(6):15-18. (in Chinese)
- [15] 李久生,陈磊,栗岩峰. 地下滴灌水器堵塞特性田间评估[J]. 水利学报, 2008, 39(10):1272-1278.
LI Jiusheng, CHEN Lei, LI Yanfeng. Field evaluation of emitter clogging in subsurface drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10):1272-1278. (in Chinese)
- [16] 李明思,康绍忠,孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4):32-35.
LI Mingsi, KANG Shaozhong, SUN Haiyan. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4):32-35. (in Chinese)
- [17] 李久生,杜珍华,栗岩峰. 地下滴灌系统施肥灌溉均匀性的田间试验评估[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4):83-87.
LI Jiusheng, DU Zhenhua, LI Yanfeng. Field evaluation of fertigation uniformity for subsurface drip irrigation systems[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):83-87. (in Chinese)
- [18] 李康勇,牛文全,张若婵,等. 施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):81-90.
LI Kangyong, NIU Wenquan, ZHANG Ruochan, et al. Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):81-90. (in Chinese)
- [19] 李康勇. 施肥对浑水滴灌滴头堵塞的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
LI Kangyong. Influence of fertigation on labyrinth channels emitters clogging under muddy water irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [20] 李庭锋,张林,王美国,等. 玉米杂交种子粒干物质积累速率差异分析[J]. 玉米科学, 2011, 19(1):78-82.
LI Tingfeng, ZHANG Lin, WANG Xianguo, et al. Difference analysis of grain accumulation rate of dry matter in maize hybrid [J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1):78-82. (in Chinese)
- [21] 刘建英,张建玲,赵宏儒. 水肥一体化技术应用现状、存在问题与对策及发展前景[J]. 内蒙古农业科技, 2006(6):32-33.
LIU Jianying, ZHANG Jianling, ZHAO Hongru. Application status, existing problems, countermeasures and development prospects of water and fertilizer integration technology[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2006(6): 32-33. (in Chinese)
- [22] 王京伟. 覆膜滴灌对大棚作物根区土壤微环境及作物生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Jingwei. Effect of mulched drip irrigation on crop root-zone soil microenvironment and crop growth in plastic greenhouse [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [23] 王心阳,王文娥,胡笑涛,等. 温室小管径滴灌管堵塞的影响因素及堵塞规律分析[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(增刊): 144-148.
WANG Xinyang, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Analysis of influencing factors and clogging discipline of thin pipeline drip irrigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Supp.):144-148. (in Chinese)
- [24] 赵姣,郑志芳,方艳茹,等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 300-308.
ZHAO Jiao, ZHENG Zhifang, FANG Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2):300-308. (in Chinese)
- [25] 周奇,王凤新,赵妍,等. 西北旱区膜下滴灌的水氮管理及种植密度对制种玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(21):166-173.
ZHOU Qi, WANG Fengxin, ZHAO Yan, et al. Influence of water and nitrogen management and planting density on seed maize growth under drip irrigation with mulch in arid region of northwest China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(21):166-173. (in Chinese)
- [26] 周舟,傅泽田,王秀,等. 滴灌施肥机灌水与施肥均匀性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5):7-13.
ZHOU Zhou, FU Zetian, WANG Xiu, et al. Experiment of fertigation uniformity of drip fertigation machine[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):7-13. (in Chinese)
- [27] EDITH E, HABIB N. Temporal soil salinity modeling using SaltMod model in the west side of Urmia hyper saline Lake, Iran [J]. Catena, 2019, 176:306-314.
- [28] TIMOTHY S G, ROBERT J L. Rainwater use by cotton under subsurface drip and center pivot irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215:1-7.