

文章编号: 1007-4929(2021)03-0051-07

限制入渗域下滴灌土壤水分时空变异特征研究

宁莎莎¹, 徐利岗², 张林³, 王怀博⁴

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 咸阳 712100; 2.宁夏水利科学研究所, 银川 750021; 3.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 咸阳 712100; 4.宁夏回族自治区水利科学研究所, 银川 750021)

摘要:为探究在限制入渗域条件下的土壤水分时空变异性特征, 在土箱中模拟根域限制栽培的立地条件, 分析不同滴头流量的点源入渗土壤水的时空分布及湿润体变化过程, 建立不同流量湿润锋运移距离与时间之间的数学关系。试验结果表明: 限制入渗域条件下试验前后湿润体形状变化明显; 限制入渗域能够有效降低水分下渗速率, 阻止无效扩散, 减少灌溉水的深层渗漏。与常规条件相比, 限制入渗域处理使土壤水下渗速率降低了2.30%~40.38%; 当灌水量相同, 灌水速率不同时, 在灌溉后期, 3 L/h的滴头流量既能减少土表水分蒸发, 也能使湿润峰达到土壤深层, 但是相比3 L/h的滴头流量, 4 L/h的滴头流量能减少水分深层渗漏。进一步验证了根域限制栽培技术在节水方面的合理性, 相关结果能够为根域限制栽培作物的滴灌滴头流量选取提供一定参考。

关键词: 根域限制栽培; 滴灌; 湿润峰运移; 土壤含水率

中图分类号: S27; TV93 **文献标识码:** A

宁莎莎, 徐利岗, 张林, 等. 限制入渗域下滴灌土壤水分时空变异特征研究[J]. 节水灌溉, 2021(3): 51-57.

NING S S, XU L G, ZHANG L, et al. Study of spatiotemporal variability characteristics of soil moisture under restricted infiltration area condition[J]. Water Saving Irrigation, 2021(3): 51-57.

Study of Spatiotemporal Variability Characteristics of Soil Moisture Under Restricted Infiltration Area Condition

NING Sha-sha¹, XU Li-gang², ZHANG Lin³, WANG Huai-bo⁴

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering of China, Northwest A&F University, Xianyang 712100, Shaanxi Province, China; 2.The Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Xianyang 712100, Shaanxi Province, China; 4.The Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to study the spatiotemporal characteristics of soil moisture under restricted infiltration area condition, the indoor soil box simulation experiment method is chosen to establish mathematical relationship between wetting front migration and time under different drip irrigation flow rates, and then variational process of wetted soil is analyzed. The results show that restricted infiltration area condition has significant effect on the shape of wetted soil. The restricted infiltration area condition can effectively reduce the infiltration rate of soil water, prevent ineffective diffusion and reduce the deep leakage of irrigation water. Compared with the normal condition, the restricted infiltration area condition can reduce the water infiltration rate by 2.30% to 40.38%. With the same irrigation amount and different irrigation rates, 3 L/h flow rate not only reduces the evaporation of soil surface water, but also makes wetting front reach the deep layer of soil at the later stage of irrigation. While compared with 3 L/h flow rate, 4 L/h flow rate reduces the deep leakage of irrigation water. This study further verifies the rationality of water-saving with cultivation technology of restricted root volume. The results can provide some references for the selection of drip irrigation flow rate of crops cultivation technology of restricted root volume.

收稿日期: 2020-08-25

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2018BBF02015, 2020BFH02014); 宁夏领军人才项目(KJT2016005)。

作者简介: 宁莎莎(1995-), 女, 研究生, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: 1527873413@qq.com。

通讯作者: 张林(1981-), 男, 副研究员, 主要从事节水灌溉理论与设备研究。E-mail: zl0211wy@163.com。

Key words: cultivation technology of restricted root volume; drip irrigation; wet front migration; soil moisture content

0 引言

根域限制栽培是根据作物根系的分布范围开挖相应的栽植沟,在沟渠边壁及底部铺垫隔膜材料,并在底部预留透气排水的空隙或铺设波纹管,栽植沟内填充秸秆、农家肥及土壤混合物后种植果树的一种栽培方式。根域限制栽培方式能抑制作物根系生长、抑制地上部分营养生长和矮化植株,并且采用滴灌点源局部水肥供给,以提高水肥利用效率。方金豹等人研究了不同根域限制方式对桃树生长的影响,得出桃树适宜的根域限制方式和根域体积^[1];王世平等人综合了在根域限制条件下葡萄、苹果、桃、樱桃的研究进展和存在问题,肯定了果树根域限制的控长促花以及提高果实品质的效果^[2];谢兆森等人从葡萄果实发育动态、果实膨压及动力学参数来探讨根域限制对葡萄果实发育及糖分积累影响的机制,研究了根域限制对葡萄果实发育动态、膨压及动力学参数的影响^[3]。但是限根技术在滴灌枸杞种植中应用的研究较少。土壤湿润体的形状、大小及含水率分布等是确定灌溉制度的重要依据^[4],许多专家和学者对滴灌的入渗特性等各方面进行了大量试验并取得了一定成果。侯立柱等人通过室内模拟试验得出滴灌对作物根系蓄水保墒效果良好^[5];李道西等人研究了不同滴头流量对不同质地的土壤水分运动规律的影响^[6]。然而当前研究对根域限制条件下滴灌的土壤水分迁移规律鲜有报道。本研究以土箱为工具模拟根域限制立地条件,开展室内试验,探究在限定土体边壁条件下,不同滴头流量点源入渗的土壤水分时空变异性特征,为根域限制栽培作物提供一定的数据参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与材料

1.1.1 试验装置

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉

表1 试验土样基本性质

Tab.1 Physical properties of tested soil

土壤	各粒径质量百分比/%			容重/(g·cm ⁻³)	田间持水量/%	饱和含水率/%
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm			
粘壤土	32.064	56.088	11.848	1.327	24.610	48.000

1.2 试验方法及测定内容

1.2.1 试验设计

为对比分析限制入渗域条件及滴灌流量对点源入渗的土壤水分时间、空间变异性特征的影响,本研究采用初始含水率 $\theta_0=2.45\%$ (占干土重)的粘壤土,开展地表滴灌土箱试验。试验设置了限制入渗域条件与常规条件,限制入渗域条件的土箱底部铺设棚膜,常规条件的土箱涂抹凡士林以防止壁面流。试验采用不同的滴头流量,分别为3 L/h、4 L/h,压力水头为10 m。

水力试验大厅进行。试验装置由水源及加压系统、滴灌带、土箱及土柱、自动土壤水分监测系统组成(图1),加压装置为可提供稳定压力的清水泵,其吸程为9 m,功率为0.75 kW;试验土箱为有机玻璃制作,尺寸为85 cm×60 cm×60 cm,采用一行两带的方式铺设方式布置滴灌带,在土箱底部及一侧边壁用棚膜铺盖(棚膜厚度10~12丝),另一侧不铺膜作为对照。



图1 试验装置实拍

Fig.1 Experimental equipment

1.1.2 试验材料及准备

试验土壤取自陕西渭河三级阶地,按试验所需土样将其风干、碾压、混合均匀后过2 mm筛网后尽可能晒干土壤备用(实际含水率以烘干法测定为准)。土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪(MS2000型,马尔文,英国)测定,按国际制土壤质地分类标准,试供土壤土质为黏壤土,采用环刀法测得容重,烘干法测得田间持水率及饱和含水率,结果如表1所示。按照设计容重1.327 g/cm³进行填土,每层5 cm,共12层,将两层之间进行打毛,使土壤颗粒充分接触。两条滴灌带平行放置在土壤表面(间距20 cm)。

试验设置不同流量的滴头。毛管安装在 $\Phi 25$ PE管上,上级管道连接至水泵,水泵出水口安装压力表及回流装置,管网系统尾部设排气阀(试验开始前进行排气处理),根据所需流量调节水压。重复试验依次进行。

1.2.2 检测指标及方法

(1) 试验过程中监测在土箱正面中心处滴头在单平面上的湿润锋演进过程,根据湿润锋的演进过程随时标记湿润锋位置并同时记录灌水时间,以滴头为中心在土箱表面将用记号笔描摹湿润线并记录湿润峰的坐标。

(2) 采用美国Decagon公司生产的EM50监测系统实时监测土壤含水率,数据步长1 min,测定深度为10、20、40、60 cm共5层,监测水平位置为滴头正下方、沿滴灌带方向距离滴头10、20 cm处,垂直滴灌带方向距离滴头10、20 cm(贴近限制入渗域边壁)处。

1.3 数据处理

该试验各处理数据采用 Excel2016 进行数据处理, Origin2017、surfer8.0绘图。

2 结果与分析

2.1 限制入渗域条件对湿润体形状及范围的影响

湿润体的形状大小与土壤质地、土壤容重、土壤初

始含水率、灌水时间、灌水量和滴头流量^[7]等众多因素有关^[8], 本试验各处理土壤的质地、容重、初始含水率均相同。按照设计分别采用滴头流量为 3 L/h 和 4 L/h 的灌水器进行滴灌, 实时监测土壤湿润锋的演进过程, 并分别绘制不同灌水时间下限制入渗域条件与常规条件的湿润体变化情况(图2)。图中原点为滴头位置, 湿润峰水平运移距离为 R , 湿润峰垂向运移距离为 H 。

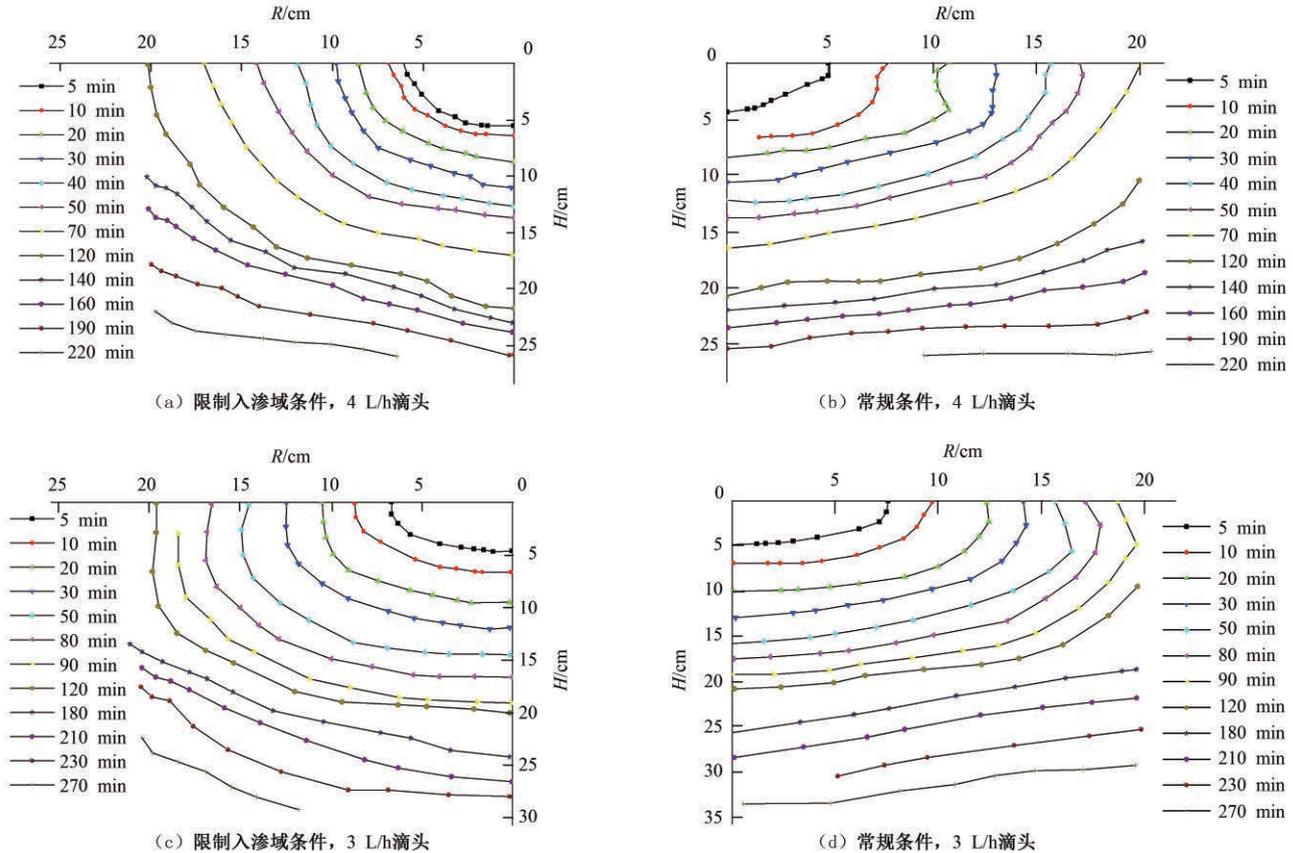


图2 不同流量下的限制入渗域与常规处理湿润峰变化

Fig.2 Wetting front movement of different flow rates and different restricted condition

从图2左右对比可以看出, 同样流量、同样入渗时长, 限制入渗域条件与常规条件下, 前期的湿润体的形状及大小差别不大, 湿润峰在同一水平面垂直于滴灌带方向和平行于滴灌带方向及其他方向的运移距离基本相同, 而入渗后期, 限制入渗域条件下湿润体呈不规则柱形, 前后形变较大。分析湿润峰数据推断水平湿润峰运移距离与垂直湿润峰运移距离存在线性关系(表2), 且判定系数(R^2)均大于0.96。各处理的回归直线的斜率均小于1, 这表明在试验开始120 min内, 各个处理湿润峰水平运移距离均大于同时时间点的垂向湿润峰运移距离。综合湿润峰水平及垂向运移特性, 湿润体呈现出以滴头为中心的半椭球体。

2.2 限制入渗域条件对湿润峰运移的影响

流量 3 L/h、4 L/h 的限制入渗域条件与常规条件下边壁湿润峰运移距离与时间的关系见图3。

当土壤水运移至边壁位置后(入渗时长>120 min), 限制入渗域条件与常规条件对水分入渗的影响非常明显。如图3所示, 在限制入渗域条件下铺膜的边壁水分入渗明显慢于常规

表2 水平湿润峰运移距离与垂直湿润峰运移距离的关系

Tab.2 Relationship between level wetting front and vertical downward wetting front

流量/(L·h ⁻¹)	边壁条件	截距	斜率	R^2
3	限制入渗域条件	3.726 4	0.779 74	0.969 2
	常规条件	3.899 9	0.678 60	0.979 1
4	限制入渗域条件	4.012 6	0.640 53	0.969 7
	常规条件	3.276 5	0.640 70	0.972 5

条件下的入渗, 入渗速率下降幅度在2.30%~40.38%, 说明在底部铺膜后对于灌水后期水分的边壁入渗及其再分布影响很大, 明显降低了水分下渗速率, 进而在灌水停止后水分再分布过程中水分深层渗漏减少。对不同处理边壁土壤水运移与时间数据进行分析得出二者符合幂函数关系, 故湿润峰运移距离与时间关系的方程可设为:

$$Y = y_0 + a(t - t_0)^b \tag{1}$$

式中: Y 为边壁湿润峰的运移距离; t 为灌水时间; a 、 b 、 y_0 、

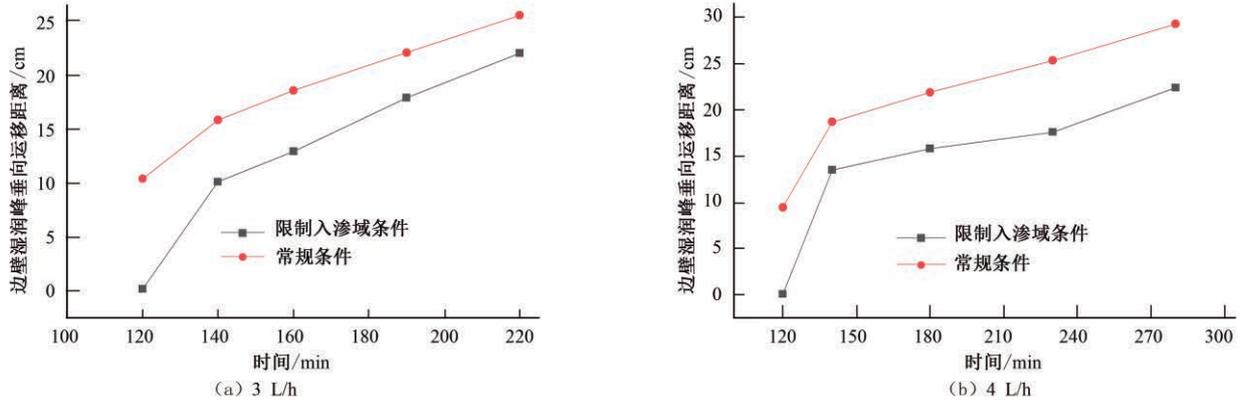


图3 限制入渗域与常规条件下边壁湿润峰运移变化

Fig.3 Boundary wetting front variation of different restricted condition

t_0 为拟合参数。

式(1)进行拟合, 拟合结果如表3所示。

根据试验实测数据对边壁湿润峰运移距离与时间关系公

表3 不同限制条件的边壁湿润峰运移与时间关系的拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of boundary wetting front migration distance with time under different emitter discharges

流量/(L·h ⁻¹)	边壁条件	γ_0	a	t_0	b	R^2
3	限制入渗域条件	0	2.038 7	120.007 6	0.513 6	0.996 8
	常规条件	0	4.039 6	108.439 3	0.389 2	0.999 0
4	限制入渗域条件	0.055 5	6.668 4	120.000 0	0.221 0	0.978 7
	常规条件	0	9.536 2	120.942 7	0.214 4	0.991 8

根据表3拟合得到的湿润峰运移的幂函数参数, 可预测各时刻湿润峰运移情况, 对比结果如表4所示。根据表4可知, 由式(1)得到的拟合值与边壁湿润峰运移距离的实测值的误差

均在2.09%~5.95%, 说明该模型能较好的预测不同时间边壁湿润峰运移距离变化。

表4 湿润峰运移距离实测值与预测值对比

Tab.4 Comparison between predicted and measured wetting front migration distance

流量/(L·h ⁻¹)	边壁条件	120 min			140 min		
		实测值/cm	预测值/cm	误差/%	实测值/cm	预测值/cm	误差/%
3	限制入渗域条件	0.169 8	0.166 0	2.25	10.094 8	9.493 7	5.95
	常规条件	10.399 0	10.472 2	0.70	15.810 7	15.480 6	2.09
4	限制入渗域条件	0.095 5	0.094 9	0.54	13.461 2	12.984 4	3.54
	常规条件	9.448 2	9.416 4	0.34	18.684 2	17.937 0	4.00

注:表中湿润峰运移实测值均为3次实测数据的均值,且标准差不超过±0.003 cm。

2.3 限制入渗域条件对土壤水空间变化的影响

限制入渗域的处理(两侧及底部铺膜)影响了土壤水入渗特征, 也导致了各土层土壤含水率空间分布的异质性。绘制湿润峰到达土箱边壁(入渗时长120 min)前后以滴头为原点的纵剖面土壤水空间分布图(图4)。从图4(a)~图4(c)可以看出灌溉水到达边壁之前含水率等值线以滴头位置为圆心, 呈1/4椭圆形, 并随入渗时间增加向外侧扩散, 土壤含水率变幅0.08~0.094m³/m³; 灌水超过120 min后的土壤含水率变化见图4(d)~图4(f), 从图4可以看出限制入渗域边壁对水分的滞留现象显著, 且对含水率等值线形状即土层水分空间分布影响较大。土壤含水率等值线外侧明显向里凹陷, 说明边壁铺膜能有效滞留水分, 减缓下渗且阻止水分的水平扩散及深层渗漏, 将有限的灌溉水限制在有限的空间范围, 提高作物对水分的利用。

2.4 滴头流量对湿润峰运移规律的影响

2.4.1 流量对湿润峰水平运移和垂直运移规律的影响

以滴头位置为原点, 分别作出各处理灌溉水到达边壁之前的湿润峰水平运移距离与时间的关系图(图5)。从图5可以看出, 不同流量湿润峰入渗初期(灌水40 min以内)在水平方向和垂直方向的运移距离的增长趋势相同, 前期增长较快, 后期逐渐趋于稳定状态。初期变幅分别为0.15~0.89 cm/min和0.15~1.1 cm/min; 灌水40 min以后, 流量为4 L/h的湿润峰水平运移距离明显大于3 L/h的, 流量为3 L/h的湿润峰水垂直运移距离大于流量为4 L/h的。

由图5可知, 不同流量下的湿润峰水平与垂直运移距离与时间为幂函数关系, 拟合参数见表5, 拟合结果的判定系数(R^2)均大于0.98, 说明该拟合结果能够较好的反映湿润峰运移距离与时间的关系。流量为4 L/h的水平湿润峰运移指数均大于流量为3 L/h的水平湿润峰运移指数, 最大为0.273 7, 对于

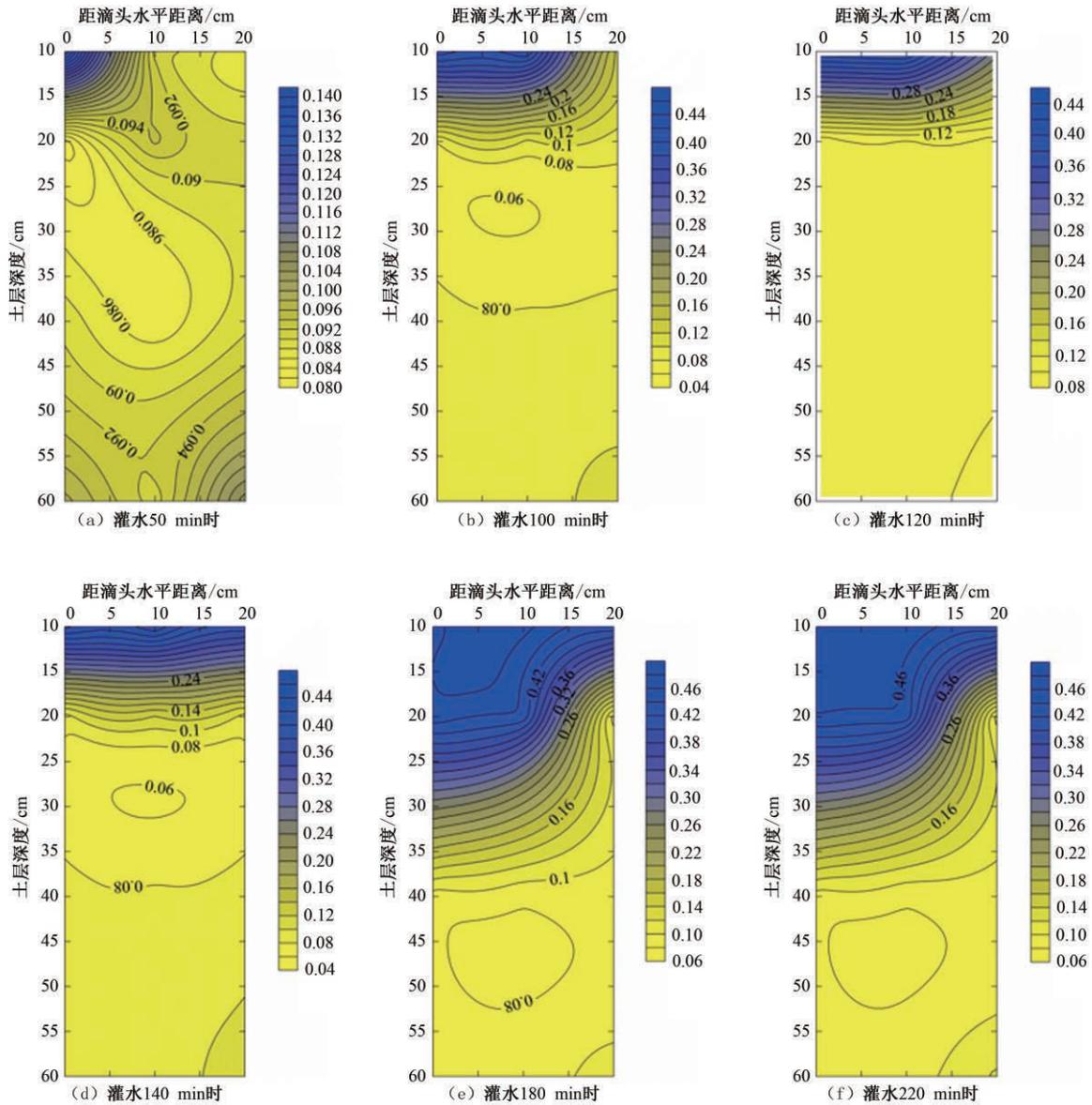


图4 限制入渗域条件下土层含水率空间变化特征图

Fig.4 Soil water content variation under root-restricted

湿润峰运移系数相差不大，在5.6~5.9之间，最大值出现在流量为4 L/h的处理中为5.977 5；且流量为4 L/h的垂直湿润峰运移距离的指数均大于流量为3 L/h的，最大为0.460 2；而流量为3 L/h的垂直湿润峰运移距离的系数要大于流量为4 L/h的，最大为2.755 6。

2.4.2 流量对边壁湿润峰垂向运移规律的影响

不同流量下在限制入渗域边壁的湿润峰运移变化情况见图6，从图6可以看出灌水120 min时流量为4 L/h的湿润峰最先移动到限制入渗域的边壁，流量为3 L/h的湿润峰在随后的10~20 min内到达限制入渗域边壁。根据图6可知各流量下湿润峰变化趋势大致相同，湿润峰初到边壁时，其移动速率最大，且随时间推移该移动速率逐渐减小，后期在相对稳定的最小值上下波动。流量4 L/h时湿润峰运移速率约为0.138 4 cm/min，流量为3 L/h时湿润峰运移速率约为0.119 6 cm/min，显然流量为4 L/h的湿润峰运移速率大于流量为3 L/h的，相差

约15.70%，说明较大流量条件下水分下渗更快，由于灌水量是一定的，所以流量为4 L/h时，在灌水期间保证水分不会深层渗漏的情况下，相比流量3 L/h的情况可以更快地地下渗到作物可吸收的土层范围，可以更快达到后期水分再分布稳定状态。

3 讨论

3.1 限制入渗域条件对湿润体形状及土壤含水量分布的影响

在灌水初期，限制入渗域条件对湿润体形状及大小影响非常小，湿润体形状近似为半椭球体^[9-11]，且大小相近，这是因为土壤水分在各个水平方向入渗较为均匀^[12]，而垂直入渗速率主要取决于两个方面：灌水速率和土壤的入渗能力^[13]，明显灌水速率大于渗水能力，所以垂直入渗速率等于土壤的渗水能力，而表面形成积水，促进了水分水平入渗，所以土壤水

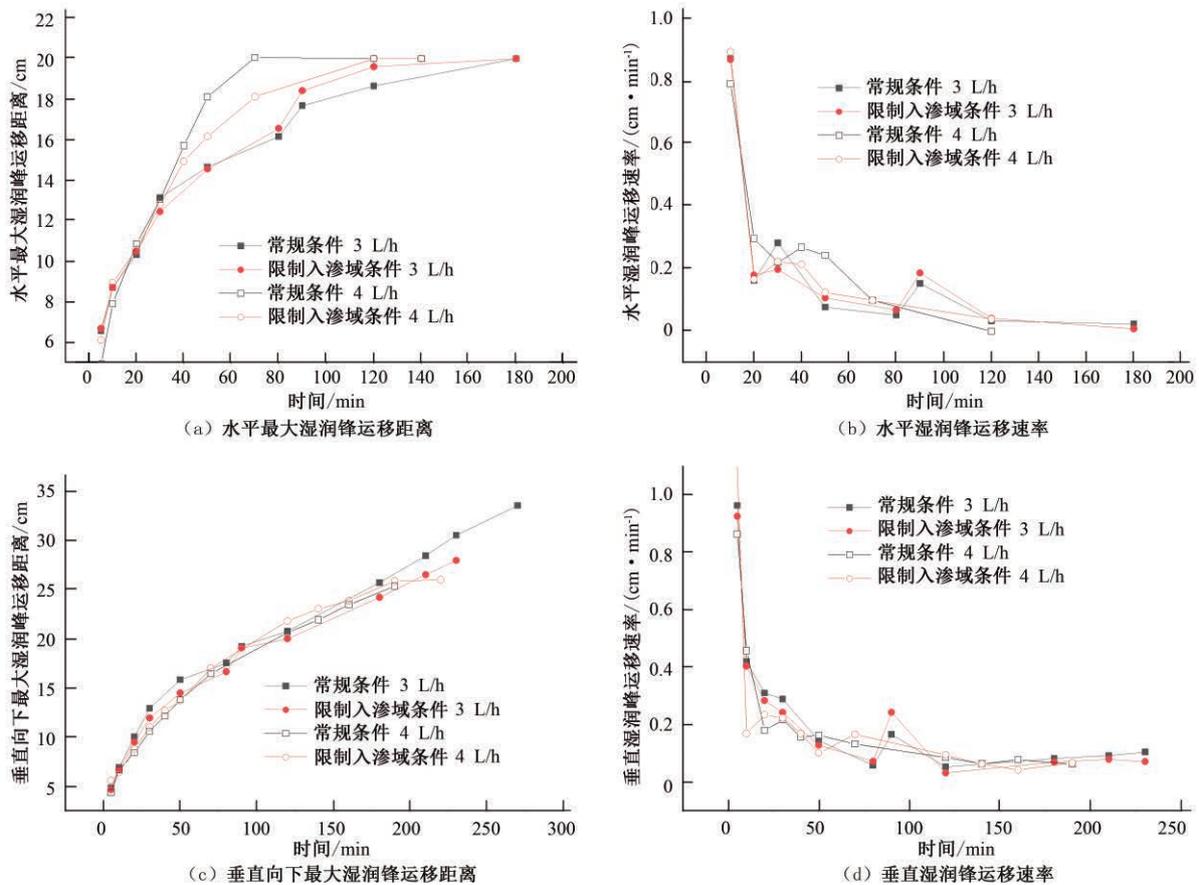


图5 不同流量滴头湿润峰水平方向及垂直方向迁移规律

Fig.5 Level wetting front and vertical downward wetting migration rule under different flow rates

表5 不同流量的水平与垂直湿润峰迁移与时间关系的拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of vertical level wetting front and vertical downward wetting front migration distance with time under different flow rates

方向	流量/(L·h ⁻¹)	边壁条件	系数	指数	R ²
水平方向	3	限根条件	5.965 9	0.259 0	0.981 8
		常规条件	5.688 1	0.261 6	0.989 2
	4	限根条件	5.977 5	0.273 7	0.981 8
		常规条件	5.869 4	0.266 3	0.980 8
垂直方向	3	限根条件	2.755 6	0.422 8	0.995 6
		常规条件	2.307 6	0.431 4	0.991 0
	4	限根条件	2.505 8	0.442 9	0.992 6
		常规条件	2.273 3	0.460 2	0.998 8

分的水平入渗大于垂直入渗,在剖面图中呈现出半椭圆形,这与张振华等人研究的地表滴灌入渗深度^[4]得出的结论明显不一致,这是因为两者在土质、土壤入渗速率、试验条件不同,导致土壤入渗能力不同,因而影响到试验结果不同。在灌水后期,由于底部铺棚膜制造出限制区域,水分入渗在限制区域内入渗,使湿润体形成不规则的柱状。

限制入渗域条件影响了土壤入渗,进而影响到土壤水分的空间分布。在灌溉水到达边壁之前,限制入渗域条件对土壤水分分布无影响,在灌溉水运移到限制入渗域边壁后,水分停止水平入渗,被限制在一定范围之内,之后仅有垂直下

渗。限制入渗域条件不仅改变了湿润体形状,还滞留了水分。停止灌水后,在土壤水分再分布阶段,限制入渗域条件使水分仅在棚膜形成的区域以内扩散,致使水分不至于深层渗漏,在大田耕作中能有效提高灌溉水的利用效率,达到节约灌溉用水的目的。

3.2 限制入渗域条件对湿润峰迁移规律的影响

限制入渗域条件对湿润峰的迁移的影响显著。虽然在水平方向上,由于各个处理土壤和滴灌各方面条件相同,在灌水初期(<120 min)限制入渗域条件对水平湿润峰无影响,但是灌水时间大于120 min后,土壤水停止水平运移,这是因为限制入渗域条件底部铺有棚膜阻止了水分水平运移;在垂直方向上,无论较大流量还是较小流量,相比于常规条件,限制入渗域条件能有效减缓灌溉水在边壁入渗,入渗速率要明显小于常规条件的入渗速率,能够将水分长时间保存在植物可吸收范围内,减少水分深层渗漏。可能是因为棚膜主要成分时高分子聚合物,其本身具有疏水性,所以棚膜的疏水性对水分下渗产生了阻力。相比常规条件,限制入渗域条件下边壁土壤水不仅受到土壤基质吸力垂直向下的分力和自身重力,而且垂直向上方向还受到棚膜对它的阻力,导致土壤水下渗减慢,有效减少水分深层渗漏。

3.3 滴头流量对湿润峰迁移规律的影响

滴头流量对湿润峰的影响主要表现在灌水后期。虽然在灌水40 min之前,由于入渗速率主要与土壤入渗能力有关,各处理入渗速率相近,使各处理水平湿润峰和垂直湿润峰运

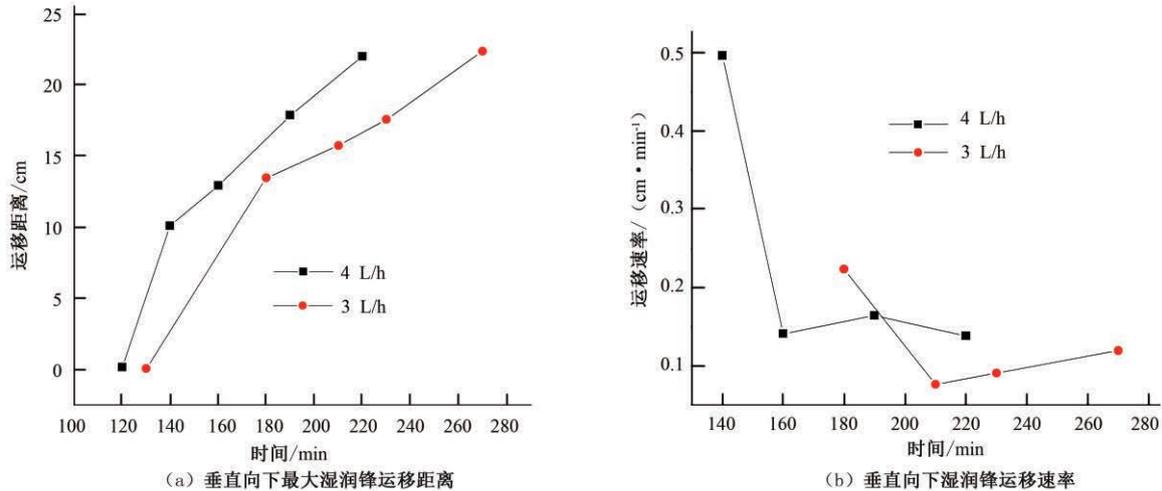


图6 不同流量下限制入渗域边壁湿润锋迁移变化

Fig.6 Boundary wetting front migration curves of different flow rates

移距离相差较小,但是在灌水40~120 min时,由于较大流量产生积水大于较小流量,导致较大流量的水平湿润锋迁移距离大于较小流量的,这与李思明、康绍忠^[15]等人研究结果一致。对于限制入渗域条件下边壁的土壤水分垂直入渗,由于此时土壤水下渗受到重力、基质势的作用,而大流量处理的湿润锋水平迁移速率快,致使边壁湿润锋处土壤水势梯度较大,土壤水分迁移速度较快^[16],因此较大流量处理在灌水时期,边界水分迁移速率大于小流量处理。较大流量的湿润锋在垂直方向的迁移距离逐渐小于较小流量的垂直湿润锋的迁移距离,主要由于灌水量一定时,较小流量的处理灌水时间长,所以当较大流量处理停止灌水后,较小流量的处理还在继续灌水,较大流量处理的土壤水分入渗速率逐渐减慢,较小流量处理的土壤水分垂直入渗速率不变。综上所述,较小流量的条件更利于土壤水分垂直入渗^[17]。

4 结论

(1) 限制入渗域条件下,滴灌湿润体的形状主要取决于限制入渗域条件,且对土壤含水率的分布有显著影响,总体而言,限制入渗域条件能有效将土壤水控制在限制区域内,保持土壤湿度。

(2) 限制入渗域条件对边壁湿润锋影响非常显著,棚膜能够阻碍土壤水的下渗,减慢水分下渗速率,但是并不能阻止土壤水分入渗。相比滴头流量为4 L/h的处理,流量为3 L/h时更有利于土壤水深层入渗。

(3) 滴头流量对灌溉水入渗及其水分再分布有较大的影响。灌水结束后,较小流量条件下,土壤水垂直迁移距离更大,并且经过水分再分布,较大流量更能保持土壤水在限制入渗域范围内,减少水分深层渗漏。

参考文献:

[1] 方金豹,顾红,陈锦永,等.根域限制对幼年桃树生长发育的影

响[J].中国农业学,2006(4):779-785.

- [2] 王世平.葡萄根域限制栽培技术[J].河北林业科技,2004(5):82-84.
- [3] 谢兆森.根域限制对葡萄果实发育动态、膨压和动力学参数的影响[C]/中国园艺学会第八届青年学术讨论会暨现代园艺论坛论文集.中国园艺学会:中国园艺学会,2008:4.
- [4] 牛文全,薛万来.矿化度对微灌土壤入渗特性的影响[J].农业机械学报,2014,45(4):163-172.
- [5] 侯立柱,赵航.双点滴灌条件下的土壤水分迁移特征[J].中国水土保持科学,2014,12(4):67-72.
- [6] 李道西,代小平,冯江,等.滴头流量和灌水量对滴灌土壤水分运动的影响[J].节水灌溉,2012(2):13-15.
- [7] 赵伟霞,张振华,蔡焕杰,等.间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J].农业工程学报,2010,26(4):87-92.
- [8] 张振华,蔡焕杰,郭永昌,等.滴灌土壤湿润体影响因素的试验研究[J].农业工程学报,2002(2):17-20.
- [9] 张振华,蔡焕杰,杨润亚.地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解[J].土壤学报,2004(6):870-875.
- [10] 王超,李援农.地下滴灌条件下湿润体特性的试验研究[J].中国农村水利水电,2011(3):38-40.
- [11] 蔡耀辉,吴普特,张林,等.微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分迁移特性对比[J].农业机械学报,2017,48(4):242-249.
- [12] 王康,张仁铎,周祖昊.土壤性质对入渗再分布影响的显色示踪试验研究[J].土壤通报,2012,43(3):577-582.
- [13] 桑以琳.土壤学与农作学[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [14] 张振华,刘继龙,蔡焕杰,等.基于地上可视湿润距离的地表滴灌入渗深度估算模式研究[J].灌溉排水学报,2006,25(1):10-13.
- [15] 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(4):32-35.
- [16] 张林,吴普特,朱德兰,等.多点滴灌条件下土壤水分迁移模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2012,30(2):237-243.
- [17] 白雪儿,艾一丹,杨昊晟,等.不同初始土壤含水率和滴头流量下滴灌土壤湿润体特征及其有效性评价[J].灌溉排水学报,2019,38(8):73-78.