

文章编号: 1672-3317(2024)05-0008-08

# 基于 HYDRUS-1D 模型的荒漠苜蓿农田滴灌灌溉制度制定

苗庆远<sup>1,2</sup>, 米丽娜<sup>1</sup>, 覃兰玉<sup>2</sup>, 朱俊毅<sup>2</sup>, 卢琦<sup>3</sup>, 杨文斌<sup>4</sup>, 程一本<sup>1,2\*</sup>

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 4. 内蒙古低覆盖治沙科技开发有限公司, 呼和浩特 010000)

**摘要:**【目的】探究提高干旱区荒漠苜蓿农田滴灌水分利用效率的方法, 制定适宜的节水灌溉制度。【方法】以苜蓿为研究对象, 基于 HYDRUS-1D 模型设置 4 种灌溉水平 (高强度大灌溉量 (LH-I)、中强度大灌溉量 (MH-I)、低强度中等灌溉量 (SM-I)、无灌溉 (CK)) 和 5 个 0~20 cm 土层初始土壤体积含水率梯度 (4%、6%、8%、10%、12%, 分别表示为 S1、S2、S3、S4、S5), 分析苜蓿根系土壤体积含水率降至土壤凋萎点的时间、峰值及维持在土壤凋萎点以上的时长, 筛选 0~20 cm 土层不同土壤初始体积含水率下的最优灌溉水平。【结果】0~20 cm 土层土壤体积含水率的变化对 SM-I、CK 灌溉水平具有显著影响; 在无灌溉的情况下, 体积含水率>10%的 0~20 cm 土层土壤会补给根系层水分; 低含水率的 0~20 cm 土层土壤更有利于 LH-I 灌溉水平下的水分在根系层的留存, SM-I 水平下根系层水分的留存时长与 0~20 cm 土层土壤体积含水率呈正相关。LH-I 灌溉水平下的深层土壤体积含水率峰值相比 MH-I、SM-I、CK 灌溉水平分别提高 10.28%、27.91%、107.93%; MH-I 灌溉水平下根系层土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时长最久, 平均为 5.7 d。【结论】当 0~20 cm 土层土壤体积含水率≤4%时, 可采用 LH-I 灌溉水平; 当 0~20 cm 土层土壤体积含水率>4%时, MH-I 灌溉水平为最优选择。

**关键词:** 荒漠农田; 紫花苜蓿; 滴灌; 含水率; 灌溉制度

中图分类号: S275.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023332

苗庆远, 米丽娜, 覃兰玉, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的荒漠苜蓿农田滴灌灌溉制度制定[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 8-15.

MIAO Qingyuan, MI Lina, QIN Lanyu, et al. Developing optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert using the HYDRUS-1D model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 8-15.

## 0 引言

【研究意义】土壤水分不足是荒漠农田作物生长的刚性约束, 灌溉是解决荒漠农田水资源匮乏的主要手段。因此, 科学高效地利用荒漠农田水资源, 制定有效的灌溉制度是当前荒漠农田的研究热点。紫花苜蓿分布广泛、产量高、营养丰富, 是享有“牧草之王”称号的优良饲料, 在世界范围内广泛种植<sup>[1-2]</sup>。随着我国西北地区绿洲农业模式的迅速发展<sup>[3]</sup>, 荒漠农田的面积迅速增加。荒漠农田具有光照充足、气温高、温差大、土壤透气性好等优势<sup>[4-5]</sup>。乌兰布和荒漠农田引黄水量有限, 灌溉用水量不足, 土壤水分是限制该地区可持续发展的一大因素<sup>[6]</sup>。

【研究进展】滴灌是一种可有效提升土壤水分利用效率、促进作物生长和提高产量的节水灌溉技术, 是荒漠农田的理想灌溉模式<sup>[7-11]</sup>。目前关于滴灌灌溉制度的研究主要集中在滴灌定额和频率上。滴灌定额影响灌溉水在土壤中的运移深度, 低定额灌溉水无法满足作物根系层的土壤水分供给, 而高定额灌溉水会下渗到深层土壤, 造成深层渗漏损失<sup>[12]</sup>。王旭晨等<sup>[12]</sup>以灌溉定额为变量, 在固定的灌水次数条件下设置不同灌水梯度, 以作物产量为标准探究适宜当地环境的灌溉制度。陈选<sup>[13]</sup>在控制灌溉定额的条件下设置不同灌溉次数, 结果表明调整灌溉次数可有效提高作物产量。范雅君等<sup>[14]</sup>进一步优化了针对作物不同生长时期的灌溉策略。HYDRUS-1D 是一款用于模拟包气带水分运移的软件, 可以模拟不同边界条件和初始条件下的土壤水分运移过程, 被广泛用于干旱区不同灌溉情形下土壤水分深层渗漏和水分胁迫研究<sup>[15]</sup>。【切入点】目前, 关于使用 HYDRUS-1D 模型制定荒漠农田滴灌灌溉制度的研究较多, 但大多聚焦于定量定次的滴灌制度, 无法针对农田灌溉前 0~20 cm 土层土壤体积含水率的不

收稿日期: 2023-07-22 修回日期: 2024-01-09

基金项目: 西北土地退化与生态恢复重点实验室(宁夏大学)开放基金(LDER2023Q05); 自然科学基金委重点项目—黄土区土壤—地表—地下水文多维耦合过程及植被调控机制(U214320030); 北京林业大学“北京市大学生科学研究与创业行动计划”(S202210022027/S202210022028)

作者简介: 苗庆远(2001-), 男, 学士, 主要从事水土保持与荒漠化防治相关研究。E-mail: 2431273603@qq.com

通信作者: 程一本(1988-), 男, 副教授, 主要从事生态水文、荒漠化防治、降雨入渗研究。E-mail: chengyiben@bjfu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

同状态进行精确灌溉。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究进一步探明荒漠农田 0~20 cm 土层不同初始体积含水率条件下的滴灌水在土壤中的运移特征，揭示滴灌农田的土壤水分动态特征及其规律，制定荒漠滴灌农田的最佳灌溉制度，为制定荒漠农田的滴灌灌溉制度提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

磴口县荒漠农田地处乌兰布和沙漠北部。该区域属于亚洲中部温带荒漠气候，兼具大陆性和季节性降水特征，降水主要集中在 6—9 月，年平均降水量为 102.9 mm，年平均蒸发量为 2 551.9 mm，地下水埋深介于 3~8 m。荒漠农田总面积达 0.196 km<sup>2</sup>，地处东经 106°9′—107°10′，北纬 40°9′—40°57′。农田主要种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)，土壤类型为壤砂土。

试验装置布设于磴口县和额济纳旗农田，观测时段为 5 月 1 日—10 月 1 日，共计 154 d，观测期间降水量、灌溉量及土壤蒸发量见图 1。5—9 月的具体灌溉制度见表 1。总灌溉量为 511 mm，降水量 41 mm，深层渗漏量为 20.2 mm，土壤贮水量变化量为 2.1 mm。

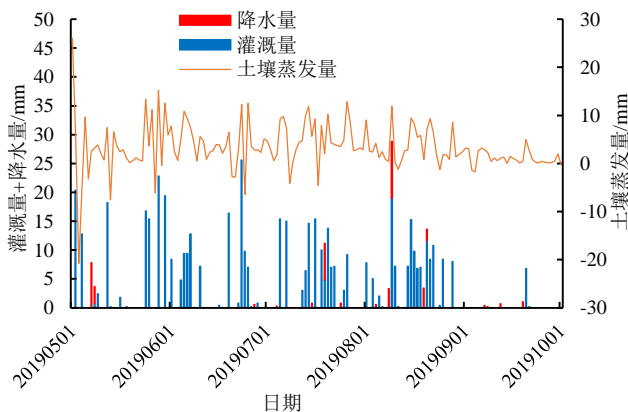


图 1 试验地灌溉量、降水量、土壤蒸发量

Fig.1 Irrigation, rainfall and soil evaporation in the sample plot

表 1 试验地 5—9 月灌溉情况

灌溉区间/(mm·d <sup>-1</sup> )	各月灌溉次数				
	5月	6月	7月	8月	9月
0	18	17	17	14	2
0~10	6	10	9	13	0
10~20	5	2	5	4	0
>20	2	1	0	0	7

### 1.2 试验材料和装置

降水量和滴灌量由原位放置的雨筒记录。不同土层深度处的土壤体积含水率由 MiniTRASE TDR (MADE IN USA) 土壤水分探头监测，监测深度分别为距地表以下 20、40、60、80、100、120、160 cm 处，测定时间间隔为 30 min。土壤水分深层渗漏

量采用新型 LYSIMETER 仪器测量，测定深度为地表以下 200 cm。农田内共布置 3 套上述设备，在圆形农田内呈等边三角形均匀分布，所测定的降水量、灌溉量、土壤体积含水率和深层渗漏量均取 3 个监测点的平均值，用于模型校准。

### 1.3 试验设计

研究区砂壤土的土壤凋萎体积含水率为 6%。苜蓿根系主要分布在 0~30 cm 土层<sup>[16-17]</sup>，试验主要观测 0~60 cm 土层的土壤体积含水率。基于 HYDRUS-1D 模型设置 4 种灌溉水平，详见表 2，分别以 LH-I、MH-I、SM-I、CK 表示；设置 5 个 0~20 cm 土层土壤初始体积含水率梯度：4%、6%、8%、10%、12%，分别以 S1、S2、S3、S4、S5 表示；20~40 cm 和 40~60 cm 土层的初始体积含水率设置为 4.5%和 4%。将不同灌溉水平和 0~20 cm 土层土壤初始含水率梯度进行自由组合，共计 20 个处理。

表 2 灌溉水平

Tab.2 Irrigation level

灌溉水平	灌溉量/mm	灌溉次数	最大灌溉强度/(mm·d <sup>-1</sup> )
高强度大灌溉量(LH-I)	43.2	3	25.6
中等强度大灌溉量(MH-I)	42.8	5	13
低强度中等灌溉量(SM-I)	36.8	5	8.8
无灌溉(CK)	0	0	0

### 1.4 测定指标

20~40 cm 土层的土壤体积含水率到达土壤凋萎点的时间、土壤体积含水率峰值、土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时长；40~60 cm 土层土壤体积含水率到达土壤凋萎点的时间、土壤体积含水率峰值。以上指标均通过 HYDRUS-1D 模型模拟得出。

### 1.5 HYDRUS-1D 模型

HYDRUS-1D 模型中涉及到的计算过程和输入条件如下：一维饱和—非饱和土壤水分运动方程基于 Richards 公式计算<sup>[18]</sup>，HYDRUS-1D 中基于 Feddes 模型来模拟根系吸水速率<sup>[19]</sup>，作物蒸腾蒸发量 ( $ET_c$ ) 基于 FAO 推荐的 Penman-monteith 方法计算<sup>[20]</sup>，根据作物根系分布，采用 Hoffman 和 Genuchten 提出的分段根系密度分布函数模拟根系分布<sup>[17,21-23]</sup>。本试验模拟期为 2019 年 5 月 18 日—9 月 7 日，模拟地表以下 20、40、60 cm 深度处的土壤体积含水率随时间的变化。采用变时间步长剖分方式，根据收敛迭代次数调整时间步长。设定初始时间步长为 0.001 d，步长极值为  $0.1 \times 10^{-4}$  d 和 5 d。模拟的上边界条件为有径流的大气边界条件，下边界条件为自由排水边界。

利用 HYDRUS-1D 模型的 Water Flow-Soil Hydraulic Parameters 功能，根据实测数据调整模型土壤水力学参数，达到实测数据与模拟数据的最优拟

合, 以获得 0~60 cm 土层的土壤水力学参数 (表 3)。

表 3 土壤水力学参数

Tab.3 Soil hydraulic parameters

土层深度/cm	$Q_r$	$Q_s$	$Alpha$	$N$	$K_s$	$l$
0~20	0.031	0.128 99	0.009 844 2	2.068 3	250	0.5
20~40	0.003 2	0.119 32	0.077 332	1.294 6	201.24	0.5
40~60	0.01	0.136 6	0.017 881	1.588 5	100	0.5

注  $Q_r$ : 残余含水率;  $Q_s$ : 饱和含水率;  $Alpha$ : 进气值倒数;  $N$ : 孔径分布系数;  $K_s$ : 饱和水力传导度;  $l$ : 孔径连通系数。

采用水量平衡式计算土壤蒸发量 ( $ET$ ), 如下:

$$ET=DI-\Delta SWC\times H\times 10-DSR, \quad (1)$$

式中:  $ET$  为土壤蒸发量 (mm);  $DI$  为滴灌量 (mm);  $\Delta SWC$  为各层土壤体积含水率的变化量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $H$  为土壤体积含水率发生变化的土层厚度 (cm);  $DSR$  为深层渗漏量 (mm)。

### 1.6 模型的验证与数据处理

基于决定系数 ( $R^2$ )、平均误差 ( $ME$ )、平均相对误差 ( $MRE$ ) 和均方根误差 ( $RMSE$ ) 对模型的准确性进行评估,  $R^2$  代表模拟值与实测值拟合程度,  $ME$  越小代表偏离程度越低,  $MRE$  与  $RMSE$  越趋近

于 0 说明模拟值与实测值之间的偏差越小。采用 Excel 软件进行数据处理与作图, 采用 SPSS 16.0 对数据进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉水平对各层土壤体积含水率的影响

不同灌溉水平下各层土壤体积含水率变化如图 2 所示。当灌溉水平为 LH-I 时, 灌溉前期 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤体积含水率相比灌溉前分别增长 6.4%、10.6%; 随着灌溉时间的延长, 40~160 cm 土层逐渐得到水分补给, 最大涨幅分别为 3.0%、2.9%、1.8%、1.8%、0.7%; 当灌溉水平为 MH-I 时, 各层土壤对水分的响应缓慢且涨幅较小, 最大涨幅分别为 1.3%、4.2%、0.1%、0.3%、0.2%、0.8%、0.1%; 当灌溉水平为 SM-I 时, 所有土层体积含水率波动幅度极小, 最大涨幅分别为 0.9%、-0.2%、-0.1%、0.2%、0.2%、0.9%、0.6%; CK 条件下, 各层土壤体积含水率呈缓慢下降趋势。

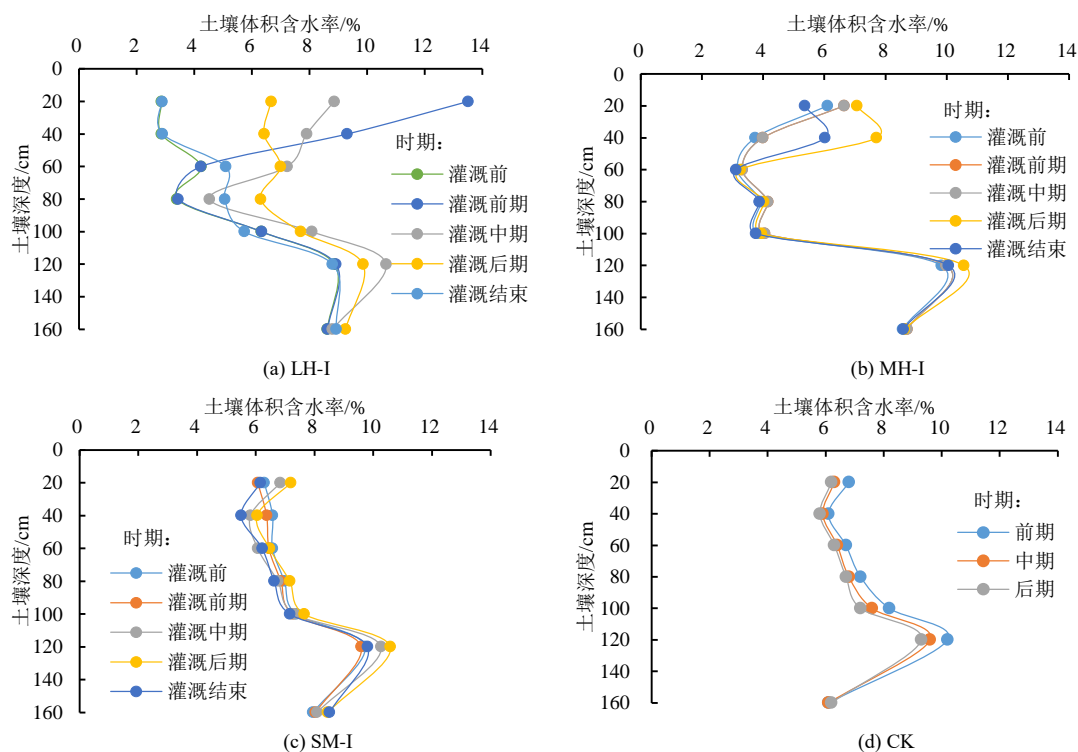


图 2 不同灌溉水平下土壤体积含水率的变化

Fig.2 Changes in soil volumetric moisture content under different irrigation levels

### 2.2 HYDRUS-1D 模型模拟效果

基于 HYDRUS-1D 模型模拟 0~60 cm 土层的土壤含水率变化 (图 3),  $R^2$  最低为 0.742 52,  $ME$  最低为 -0.000 67,  $MRE$  最低为 0.156 115,  $RMSE$  最低为 0.010 378 (表 4), 模拟结果可信度较高。

### 2.3 0~20 cm 土层土壤初始体积含水率 ( $Q_0$ ) 对根系层和深层土壤水分的影响

不同  $Q_0$  条件下的根系层 (20~40 cm) 土壤体积

含水率到达凋萎点的时间如表 5 所示。4 种灌溉水平下, 随着  $Q_0$  的增加, 根系层土壤体积含水率到达凋萎点的时间均呈减小趋势。LH-I、MH-I、SM-I 灌溉水平下, 根系层土壤体积含水率到达凋萎点的时间随  $Q_0$  的增加分别由 S1 处理下的 2.5、2.7、2.8 d 减小为 0.3、0.3、0.4 d; CK 条件下, 根系层土壤体积含水率仅在 S5 处理下到达凋萎点。

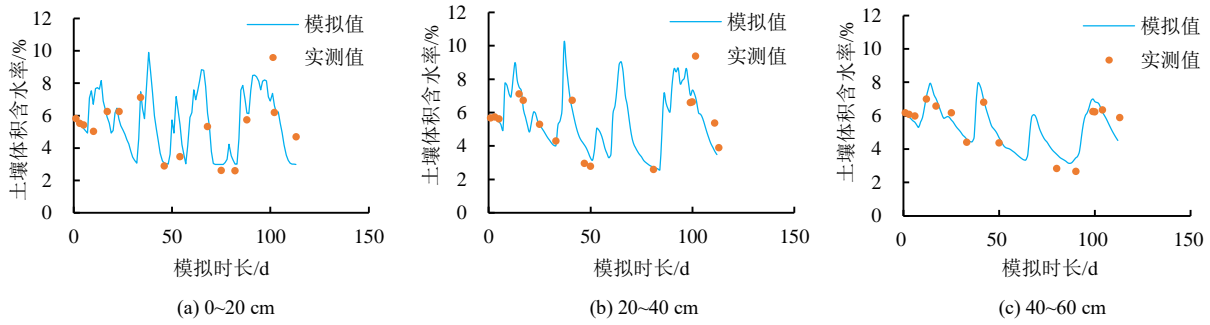


图 3 土壤体积含水率模拟值与实测值之间的拟合情况

Fig.3 Comparison of simulated and measured soil volume moisture content values

表 4 模拟性能评价

Tab.4 Simulation effect evaluation

指标	20 cm	40 cm	60 cm
$R^2$	0.742 52	0.841 79	0.812 76
ME	-0.000 67	-0.004 59	-0.003 9
RME	0.156 115	0.196 887	0.205 109
RMSE	0.010 62	0.012 695	0.010 378

不同  $Q_0$  条件下根系层土壤体积含水率峰值变化情况如图 4 和表 5 所示。随着  $Q_0$  的增加, 4 种灌溉水平下根系层土壤体积含水率的峰值呈增大趋势。S1 处理下, LH-I、MH-I、SM-I、CK 灌溉水平下的根系层土壤体积含水率的峰值较初始含水率 (4.5%) 分别上涨 4.5%、3.6%、2.5%、0.1%; S2 处理下分别上涨 4.6%、3.9%、3.3%、0.3%; S3 处理下分别上涨 4.8%、4.6%、3.8%、0.5%; S4 处理下分别上涨 5%、5.1%、4.3%、2.2%; S5 处理下分别上涨 5.7%、5.1%、4.7%、2.1%。随着  $Q_0$  的增加, LH-I 和 MH-I

灌溉水平下的根系层土壤体积含水率峰值涨幅较为稳定, SM-I 和 CK 灌溉水平下的涨幅较为剧烈。

由表 5 可知, LH-I 水平下, 随着  $Q_0$  的增加, 根系层水分保持在凋萎系数之上的时长呈先减小后增大的趋势, S1 处理下的时长最久, 为 6.0 d; MH-I 水平下, 随着  $Q_0$  的增加, 根系层水分保持在凋萎系数之上的时长呈先增大后减小的趋势, S4 处理下的时长最久, 为 7.7 d; SM-I 水平下, 根系层水分保持在凋萎系数之上的时长随着  $Q_0$  的增加呈持续上升趋势, S5 处理下的时长最久, 为 6.6 d; CK 水平下, 根系层土壤体积含水率仅在 S5 处理下到达凋萎点。

不同  $Q_0$  条件下深层 (40~60 cm) 土壤体积含水率变化如图 5 所示。LH-I、MH-I、SM-I 水平下, 随着  $Q_0$  的增加, 深层土壤体积含水率的峰值和到达凋萎点所需的时间分别呈增大和减小的趋势, CK 水平下深层土壤体积含水率未到达凋萎点。

表 5 0~20 cm 土层土壤不同初始体积含水率下距地表以下 40、60 cm 深度处土壤指标

Tab.5 Soil indicators at depths of 40 cm and 60 cm below the surface under different initial volume moisture contents in shallow soil

处理	距地表以下 40、60 cm 深度处土壤 体积含水率到达凋萎点的时间/d		距地表以下 40、60 cm 深度处 土壤体积含水率峰值/%		距地表以下 40 cm 深度处土壤体积 含水率维持在凋萎系数以上时长/d	
	40 cm	60 cm	40 cm	60 cm	40 cm	
S1	LH-I	2.5	4.3	9.0	7.6	6.0
	MH-I	2.7	5.0	8.1	6.7	3.9
	SM-I	2.8	-	7.0	5.6	3.0
	CK	-	-	4.6	4.0	-
S2	LH-I	1.7	3.8	9.1	8.5	4.2
	MH-I	1.9	3.9	8.4	7.8	4.7
	SM-I	2.0	5.6	7.8	6.3	4.4
	CK	-	-	4.8	4.0	-
S3	LH-I	1.6	3.3	9.3	9.6	4.3
	MH-I	1	3.4	9.1	8.7	5.7
	SM-I	1.2	3.6	8.3	8.0	5.6
	CK	-	-	5.0	4.4	-
S4	LH-I	1.4	3.0	9.5	10.4	4.6
	MH-I	0.9	3.1	9.6	9.5	7.7
	SM-I	0.8	3.6	8.8	8.0	6.3
	CK	-	-	5.7	4.4	-
S5	LH-I	0.3	2.8	10.2	11.1	5.7
	MH-I	0.3	2.7	9.6	10.1	6.4
	SM-I	0.4	2.9	9.2	9.0	6.6
	CK	0.5	-	6.6	5.9	2.8

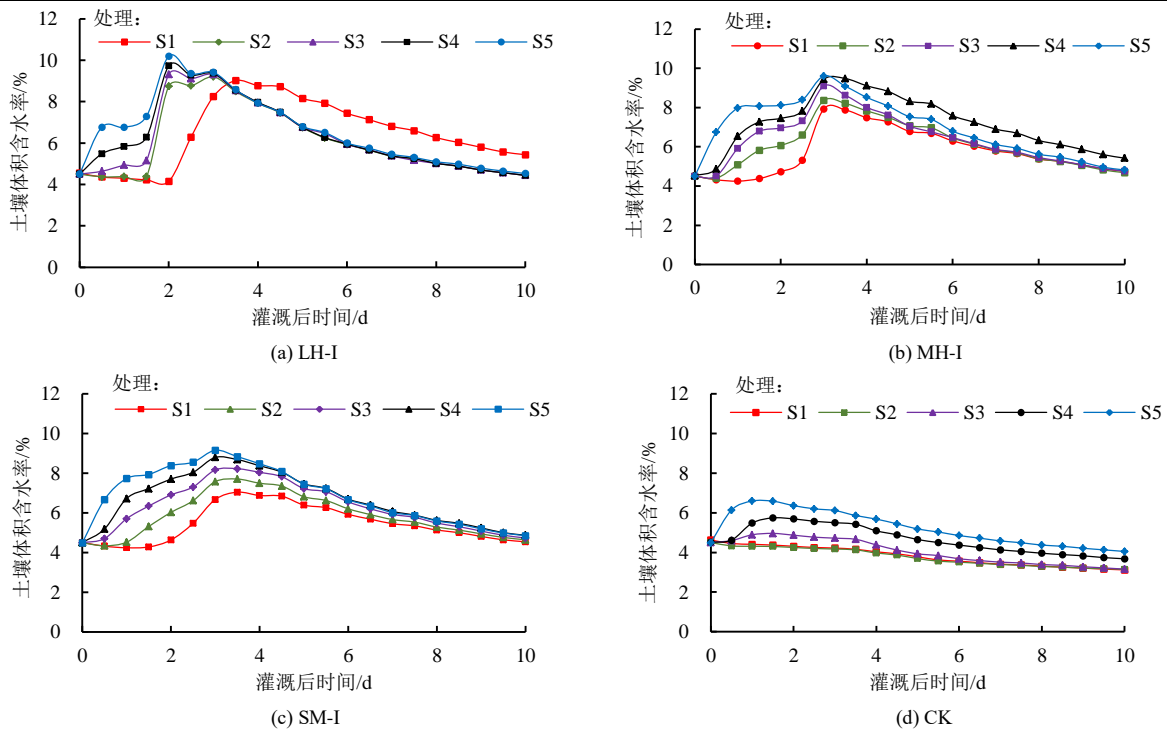


图 4 不同灌溉水平和 0~20 cm 土层土壤初始体积含水率下的根系层含水率变化

Fig.4 Changes in root layer moisture content under different irrigation levels and initial volume moisture content of shallow soil

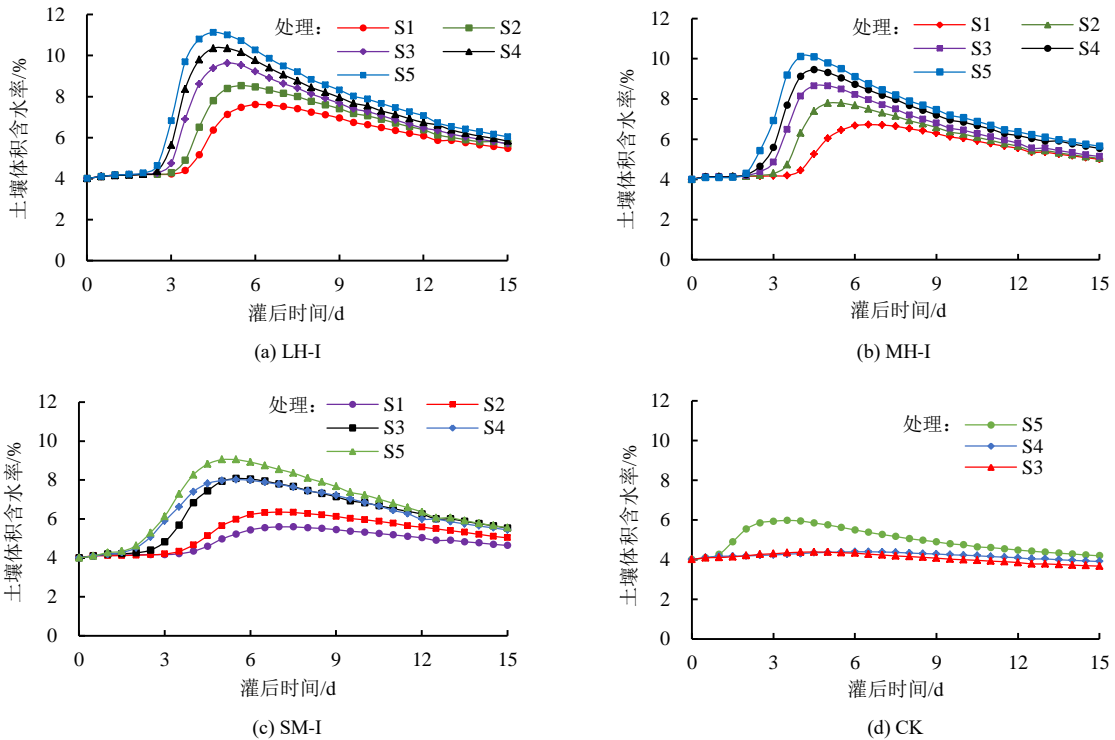


图 5 不同灌溉水平和 0~20 cm 土层土壤初始含水率下的深层土壤含水率变化

Fig.5 Changes in deep soil moisture content under different irrigation levels and initial moisture content of shallow soil

#### 2.4 灌溉水平对根系层和深层土壤水分的影响

由表 6 可知, LH-I、MH-I、SM-I 灌溉水平下的根系层土壤体积含水率到达凋萎点的时间无显著差异。在土壤体积含水率峰值方面, LH-I 灌溉水平显著高于 SM-I 和 CK, LH-I 和 MH-I 水平之间无显著差异。在根系层土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时长方面, LH-I、MH-I、SM-I 3 种灌溉水平无显著差异, 总体表现为 MH-I>SM-I>LH-I, 其中 MH-I

水平下的平均维持时间最久, 为 5.7 d。

LH-I、MH-I、SM-I 灌溉水平下的深层土壤体积含水率到达凋萎点的时间无显著差异。不同灌溉水平下土壤体积含水率的峰值大小关系为: LH-I>MH-I>SM-I>CK, 平均峰值分别为 9.44%、8.56%、7.38%、4.54%。LH-I 灌溉水平下的深层土壤体积含水率峰值较 MH-I、SM-I、CK 水平分别提高 10.28%、27.91%、107.93%。

表 6 不同灌溉水平下距地表以下 40、60 cm 深度处的土壤指标

Tab.6 Soil indicators at depths of 40 cm and 60 cm above the surface under different irrigation levels

灌溉水平	距离地表以下 40 cm 深度处土壤 体积含水率到达凋萎点的时间/d	距离地表以下 40、60 cm 深度处 土壤体积含水率峰值/%		距离地表以下 40 cm 深度处土壤体积含水率 维持在凋萎系数以上时长/d
	40 cm	40 cm	60 cm	40 cm
LH-I	1.5a	9.42a	9.44a	5.0a
MH-I	1.4a	8.96ab	8.56ab	5.7a
SM-I	1.4a	8.22b	7.38b	5.2a
CK	-	5.34c	4.54c	-

### 3 讨论

LH-I 灌溉水平 (总灌溉量 43.2 mm, 最大灌溉强度 25.6 mm/d)、MH-I 灌溉水平 (总灌溉量 42.8 mm, 最大灌溉强度 13 mm/d)、SM-I 灌溉水平 (总灌溉量 36.8 mm, 最大灌溉强度 8.8 mm/d) 对土壤水分的补给深度分别为 160、40、20 cm, 这与本研究后续的模拟结果存在差异。原因可能是因为 3 种灌溉水平的灌溉前 0~20 cm 土层土壤初始体积含水率不同, LH-I 灌溉水平下的灌溉前 0~20 cm 土层土壤初始含水率为 2.9%, MH-I 为 5.4%, SM-I 为 6.3%。本研究使用 HYDRUS-1D 模型模拟不同灌溉水平和 0~20 cm 土层土壤初始体积含水率下的 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤含水率变化, 这种方法在不同的灌水方式中已有大量研究。卞建民等<sup>[20]</sup>在大兴灌区利用 HYDRUS-1D 进行了灌溉对玉米地土壤的入渗补给模拟研究。金建新等<sup>[21]</sup>利用 HYDRUS-1D 模型对西北干旱区的玉米灌溉制度进行了优化。本研究基于实测的 0~160 cm 土层土壤含水率, 初步分析苜蓿农田不同灌溉水平下的土壤水分动态变化, 随后设定 4 种灌溉水平下的 0~20 cm 土层土壤不同梯度体积含水率, 从而模拟根系层和深层土壤水分变化情况, 得到土壤体积含水率到达凋萎点的时间、土壤体积含水率峰值、土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时长 3 个参数值, 最后提出荒漠苜蓿农田滴灌灌溉制度。随着  $Q_0$  的增加, LH-I 和 MH-I 灌溉水平下的根系层土壤体积含水率涨幅稳定, SM-I 和 CK 灌溉水平涨幅较为剧烈, 这与康金林等<sup>[22]</sup>研究结果一致。初始含水率越高, 入渗初期的土壤水吸力越弱, 加上水分的持续输入, 土壤含水率逐渐增大, 土壤孔隙度减小, 相同时间内的入渗率和累积入渗量也越低<sup>[23]</sup>。0~20 cm 土层的低含水率有利于高强度灌溉 (LH-I) 对根系层土壤水分的补给, 适当含水率的 0~20 cm 土层土壤对中等强度灌溉 (MH-I) 下的根系层水分的留存时长具有促进作用, 低强度灌溉下的根系层水分留存时长与 0~20 cm 土层的土壤体积含水率呈正相关, 这与 Merdun 等<sup>[24]</sup>、Wei 等<sup>[25]</sup>研究结果相似。在无降水和灌溉情况下, 土壤初

始含水率较高有利于根系层和深层土壤水分补给, 这与王新平等<sup>[26]</sup>研究结果一致。这是由于上层土壤越湿润, 土壤湿润锋与下层干燥土壤的平均势梯度越大, 从而产生更大的入渗通量, 增强水分的入渗能力。LH-I、MH-I、SM-I 灌溉水平中, MH-I 灌溉水平下的土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时间最长, 平均为 5.7 d。这与郭琛等<sup>[27]</sup>、贾运岗等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。高强度降水和灌溉是补充地下水的重要途径, 但也会导致土壤水分渗漏<sup>[29]</sup>。在 LH-I 灌溉水平下, 深层土壤会得到更多的水分补给, 由此造成灌溉水资源浪费。

### 4 结论

1) 0~20 cm 土层土壤体积含水率的变化对 SM-I、CK 灌溉水平具有显著影响; 在无灌溉的情况下, 体积含水率大于 10% 的 0~20 cm 土层土壤会补给根系层水分。

2) 低含水率的 0~20 cm 土层土壤更有利于 LH-I 灌溉水平下水分在根系层的留存, SM-I 水平下根系层水分的留存时长与 0~20 cm 土层土壤体积含水率呈正相关, MH-I 灌溉水平下根系层土壤体积含水率维持在凋萎点之上的时间最长, 平均为 5.7 d。

3) 当 0~20 cm 土层土壤体积含水率不超过 4% 时, 可采用 LH-I 灌溉水平; 当 0~20 cm 土层土壤体积含水率大于 4% 时, MH-I 灌溉水平为最优选择。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 王星, 黄薇, 余淑艳, 等. 宁夏地区地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿种子产量及构成因素的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(9): 76-85.  
WANG Xing, HUANG Wei, YU Shuyan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on seed yield and composition of alfalfa grown with underground drip irrigation in Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 76-85.
- [2] 刘纯. 西北旱区紫花苜蓿耗水量对品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.  
LIU Chun. Effect of water consumption on alfalfa quality in arid areas of northwest China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [3] 刘跃横. 沙漠中的农业奇迹[J]. 大科技(百科新说), 2016(11): 6-8.
- [4] 佟长福, 李和平, 牛海, 等. 土壤水分调控对滴灌紫花苜蓿作物系数和水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(14): 74-79.  
TONG Changfu, LI Heping, NIU Hai, et al. The Impact of soil moisture

- control on crop coefficient and water use efficiency of drip-irrigated alfalfa[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(14): 74-79.
- [5] 吴勇, 刘晓静, 童长春, 等. 施氮对西北荒漠灌区紫花苜蓿土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 58-64.  
WU Yong, LIU Xiaojing, TONG Changchun, et al. Effect of nitrogen application on soil physicochemical property and microbial quantity of alfalfa in desert irrigation area of northwest China[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(6): 58-64.
- [6] 孟洋, 杨松, 尹俊. 推进内蒙古黄河流域生态农业高质量发展: 以磴口县乌兰布和沙漠为例[J]. 北方经济, 2021(4): 26-28.
- [7] 李云鹏. 半干旱地区节水灌溉研究[J]. 水利技术监督, 2018, 26(3): 118-120.
- [8] 陈高明. 辽西半干旱地区花生膜下滴灌灌溉制度研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.  
CHEN Gaoming. Study on the irrigation schedule of the peanut under mulched drip irrigation in the semi-arid region of Liaoning northwest area[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [9] 黄龙. 半干旱区猕猴桃树滴灌耗水特性与灌溉制度试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.  
HUANG Long. Experimental study on water consumption characteristics and irrigation schedule of kiwifruit trees drip irrigation in semi-arid region[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [10] 郑星东. 吉林省半干旱区玉米膜下滴灌灌溉制度分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
ZHENG Xingdong. Analysis and research on drip irrigation system of corn membrane in semi-arid areas in Jilin Province[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [11] 宋春妮, 焦燕, 杨文柱, 等. 我国半干旱区滴灌水肥一体化马铃薯田土壤 NH<sub>3</sub> 挥发特征和强度及影响因素[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 173-182.  
SONG Chunni, JIAO Yan, YANG Wenzhu, et al. Characteristics and intensity of soil ammonia volatilization and study on influencing factors in potato fields under drip integration water and fertilizer integration in semi-arid region of China[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 173-182.
- [12] 王旭晨, 李应海, 李金泽. 滴灌条件下不同灌水量对盛产期黄花菜生长及产量影响研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(5): 90-94, 99.  
WANG Xuchen, LI Yinghai, LI Jinze. Study on the effect of different irrigation water quantity on the growth and yield of daylily in the high-yielding period under the condition of drip irrigation[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(5): 90-94, 99.
- [13] 陈选. 黑龙江省西部玉米膜下滴灌灌溉制度试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.  
CHEN Xuan. Experimental study on drip irrigation system under mulch of maize in western Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [14] 范雅君, 吕志远, 田德龙, 等. 河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 123-129.  
FAN Yajun, LYU Zhiyuan, TIAN Delong, et al. Irrigation regime for corn production with drip irrigation and plastic mulching in Hetiao irrigation region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 123-129.
- [15] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最近研究与应用进展[J]. 土壤, 2022, 54(2): 219-231.  
GAO Zhenguo, ZHONG Ruilin, YANG Shuai, et al. Recent progresses in research and applications of hydrus model in China[J]. Soils, 2022, 54(2): 219-231.
- [16] 白文明, 左强, 黄元仿, 等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 35-41.  
BAI Wenming, ZUO Qiang, HUANG Yuanfang, et al. Effect of water supply on root growth and water uptake of alfalfa in Wulanbuhe sandy region[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(1): 35-41.
- [17] 张松. 紫花苜蓿地下滴灌关键技术参数及灌溉制度优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.  
ZHANG Song. Research on the key technical parameters and optimizing irrigation schedule in underground drip irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [18] LI Y R, ZHANG X C, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development[J]. Science of the Total Environment, 2021, 756: 143-676.
- [19] 吴元芝, 黄明斌. 基于 Hydrus-1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 66-73.  
WU Yuanzhi, HUANG Mingbin. Analysis of influential factors for maize root water uptake based on Hydrus-1D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S2): 66-73.
- [20] 卞建民, 李育松, 胡昱欣, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的大安灌区旱田灌溉入渗补给研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 191-195.  
BIAN Jianmin, LI Yusong, HU Yuxin, et al. Study on recharge from dry farmland irrigation based on the Hydrus-1D model in Da'an irrigation district[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 191-195.
- [21] 金建新, 张娜, 黄建成, 等. 利用 Hydrus-1D 模型优化玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(S2): 142-146.  
JIN Jianxin, ZHANG Na, HUANG Jiancheng, et al. Drip irrigation system under maize film by Hydrus-1D model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S2): 142-146.
- [22] 康金林, 杨洁, 刘空军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126.  
KANG Jinlin, YANG Jie, LIU Yaojun, et al. Impacts of soil initial water content and bulk density on infiltration law of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 122-126.
- [23] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1 571-1 578.  
WANG Bo, DUAN Yuxi, WANG Weifeng, et al. Responses of shallow soil water content in Artemisia ordosica community to different rainfall patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1 571-1 578.
- [24] MERDUN H, MERAL R, RIZA DEMIRKIRAN A. Effect of the initial soil moisture content on the spatial distribution of the water retention[J]. Eurasian Soil Science, 2008, 41(10): 1 098-1 106.
- [25] WEI L, YANG M Y, LI Z, et al. Experimental investigation of relationship between infiltration rate and soil moisture under rainfall conditions[J]. Water, 2022, 14(9): 1 347.
- [26] 王新平, 康尔泗, 李新荣, 等. 荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 592-596.  
WANG Xinping, KANG Ersi, LI Xinrong, et al. The influence of initial soil conditions on water penetration and soil moisture distribution[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 592-596.
- [27] 郭琛, 祁通, 侯振安, 等. 滴灌条件下灌溉量和频率对杂交棉生长和产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1 872-1 877.  
GUO Chen, QI Tong, HOU Zhenan, et al. Effects of irrigation amount and frequency on the growth and yield of hybrid cotton under drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(9): 1 872-1 877.
- [28] 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.
- [29] 吴丽丽, 程一本, 杨文斌, 等. 毛乌素沙地流动沙丘不同深度土壤渗漏特征[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7 960-7 967.  
WU Lili, CHENG Yiben, YANG Wenbin, et al. Analysis of the soil percolation characteristics at different depths of a mobile sand dune in the Mu Us sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7 960-7 967.

## Developing optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert using the HYDRUS-1D model

MIAO Qingyuan<sup>1,2</sup>, MI Lina<sup>1</sup>, QIN Lanyu<sup>2</sup>, ZHU Junyi<sup>2</sup>, LU Qi<sup>3</sup>, YANG Wenbin<sup>4</sup>, CHENG Yiben<sup>1,2\*</sup>

(1. Cultivation Base of State Key Laboratory of Northwest Land Degradation and Ecological Restoration of Ningxia University/Key Laboratory of Northwest Degraded Ecosystem Restoration and Reconstruction of the Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China; 3. China Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China; 4. Inner Mongolia Low Coverage Desertification Control Technology Development Co., Ltd, Hohhot 010000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Soil water is one of the most important abiotic factors influencing plant growth in arid areas. This paper aims to develop an optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert farmlands in Northwestern China. **【Method】** The study was based on the HYDRUS-1D model. It compared four irrigation schedules: intensive irrigation (LH-I), moderate intensity irrigation (MH-I), and low intensity irrigation (SM-I). Without irrigation was the control (CK). Each irrigation schedule was associated with five initial volumetric water contents in the 0-20 cm soil layer: 4% (S1), 6% (S2), 8% (S3), 10% (S4) and 12% (S5). Overall, there were 20 combinations. In the simulation for each treatment, we “measured” the time for soil water in the root zone to reach the wilting point, as well as the soil water content at the wilting point. We also measured the time-period during which the soil water content in the root zone remained above the wilting point. These enabled us to find the optimal irrigation schedule. **【Result】** The effect of SM-I and CK on the above criteria was more sensitive to change in the initial soil water content in the top 0-20 cm of soil. The plant roots were able to take up water even without irrigation when the initial soil water content in the 0-20 cm of soil was greater than 10%. When the initial soil water content was less than 20%, the majority of irrigated water in the LH-I treatment remained in the topsoil. With an appropriate initial moisture content, the topsoil had a positive effect on retaining the irrigation water from MH-I in the root zone. The retention time of water in the root zone was positively correlated with the topsoil water content in SM-I. The water content in the deep soil was greater in LH-I irrigation than in other treatments. Soil water content remained above the withering point for 5.7 days in MH-I, the longest among all treatments. **【Conclusion】** When initial volumetric water content in the 0-20 cm soil layer was less than 4%, LH-I was optimal, when the initial topsoil water content was higher than 4%, MH-I worked the best.

**Key words:** desert farmland; alfalfa; drip irrigation; moisture content; irrigation scheduling

责任编辑：韩洋

(上接第 7 页)

## Effects of irrigation amount on soil water, water consumption and yield of spring maize in Northwestern China

ZHAO Jinghua<sup>1,3</sup>, YUAN Ruxin<sup>1,3</sup>, WANG Jinmao<sup>2</sup>, MENG Xinmei<sup>4</sup>, YANG Tingrui<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Urumqi 830000, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Hebukesai County Water Conservancy Bureau, Tacheng 834499, China)

**Abstract:** **【Objective】** The production of spring maize in Northwestern China relies on irrigation. The purpose of this paper is to investigate experimentally the impact of irrigation amount on the yield, water consumption of the maize, as well as soil water dynamics. **【Method】** The field experiment was conducted from may to september 2021 at the Karamay Agricultural Comprehensive Development Zone. It comprised six treatments by irrigating the maize at: 225 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W1), 300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W2), 375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W3), 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W4), 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W5), and 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W6). In each treatment, we measured the spatiotemporal change in soil water, as well as ultimate yield and water consumption of the crop. **【Result】** ① Regardless of irrigation amounts, soil water content increased with soil depth first and then declined, followed by another increase in the soil depth from 0 to 100 cm. Compared with the other five treatments, W5 increased soil water storage in the 0-100 cm of soil by 2.35%-9.11%, 0.21%-4.37%, 0.39%-1.79%, 0.60%-4.48% at trumpet stage, tasseling stage, milk stage, and full maturity stage, respectively. ② At maturity stage, the 100-grain weight in W5 was significantly higher than that in W1 and W2, but was comparable to that in W3, W4 and W6. W5 also increased the grain number per spike by 10.49%-36.01% and the spike length by 8.31%-27.12%, compared with the other five treatments. ③ The results obtained from of the analysis of the comprehensive evaluation model showed the comprehensive evaluation index of W5 was 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, the highest among all treatments. **【Conclusion】** Irrigating 10 times, with the total irrigation amount being 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> during the whole growing season is optimal for spring maize production in the Karamay region in Northwestern China.

**Key words:** soil water content; characteristics of water expend; yield; spring corn; irrigation water quota optimization

责任编辑：白芳芳