

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.028

农田水盐运移与作物生长对亏水滴灌的响应和模拟研究

薄丽媛^{1,2} 赵引^{1,2} 毛晓敏^{1,2} 陈帅^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 农业农村部作物高效用水武威科学观测实验站, 武威 733000)

摘要: 为探究西北干旱地区农田水盐运移与作物生长对亏水滴灌的响应以及层状土壤中水分-溶质运移和作物生长耦合模型(Layered soil water - solute transport and crop growth model, LAWSTAC)的适用性,设置3种水分处理W100、W70、W40,分别表示灌溉需水量的100%、70%和40%,于2018年在农业农村部作物高效用水武威科学观测实验站进行了大田试验。结果表明:在制种玉米生长苗期,单次灌水后,浅层(0~20 cm)土壤含盐量降低;经全生育期灌溉后,灌水量越大,浅层脱盐和深层积盐现象越明显。3种水分处理下灌水量越多的处理,制种玉米叶面积指数(LAI)和最终地上生物量越高,作物长势越好。LAWSTAC模型能较好地模拟农田水盐运移和制种玉米的生长过程;各处理LAI模拟值与实测值之间的决定系数 R^2 均为0.99, RMSE为0.20~0.87 cm²/cm²;各处理地上生物量的模拟值与实测值的 R^2 均为0.99, RMSE为1.62~3.57 t/hm²,说明LAWSTAC模型可以较为准确地模拟制种玉米LAI、地上生物量的动态变化。0~80 cm土层贮水量的模拟结果表明,各处理 R^2 为0.41~0.61, RMSE为12~21 mm;0~80 cm土壤盐分质量浓度的模拟结果表明,各处理 R^2 为0.53~0.60, RMSE为1.37~2.56 g/L,效果较好。因此,LAWSTAC模型可为当地复杂土壤条件的农田进行生产力的初步预测与评估。

关键词: 水分亏缺; 水盐运移; 作物生长; LAWSTAC模型

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0248-08

OSID:



Response and Simulation of Farmland Water - Salt Transport and Growth of Crops to Deficit Drip Irrigation

BO Liyuan^{1,2} ZHAO Yin^{1,2} MAO Xiaomin^{1,2} CHEN Shuai^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Wuwei Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuwei 733000, China)

Abstract: The research was based on a developed model for farmland water - salt transport and crop growth (LAWSTAC). In order to explore the response of farmland water and salt transport and crop growth to deficient drip irrigation and test the applicability of LAWSTAC model in the northwest arid region, field experiment was carried out in the Wuwei Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs in 2018. Three treatments were considered in the experiment, including three irrigation levels, i. e., 100%, 70% and 40% of full irrigation (i. e., W100, W70 and W40), respectively. The results showed that salinity in shallow (0~20 cm) soils was reduced after the irrigation during the seedling period of seed-maize production. For the whole growth period, the greater the irrigation amount was, the more obvious the phenomenon of desalination in upper layer and salt accumulation in deeper layer was. Larger irrigation generally resulted in higher plant leaf area index (LAI) and higher final above-ground biomass of the seed-maize under the three irrigation levels. The LAWSTAC model can well simulate the farmland water - salt transport and the growth of seed-maize. The values of determination coefficient (R^2) of the simulated and measured LAI were 0.99, and the values of root mean square error (RMSE) were between 0.20 cm²/cm² and 0.87 cm²/cm². The values of R^2 of the simulated and measured aboveground biomass were 0.99, and the values of RMSE were between 1.62 t/hm² and 3.57 t/hm². It was demonstrated that the LAWSTAC model can accurately

收稿日期: 2020-04-30 修回日期: 2020-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679234, 51790535)

作者简介: 薄丽媛(1993—),女,博士生,主要从事水文水资源研究, E-mail: boliyuan1993@163.com

通信作者: 毛晓敏(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事水文水资源与农业水土工程研究, E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

simulate the dynamic changes of LAI and aboveground biomass of seed-maize. LAWSTAC model was validated for simulating soil water storage in 0 ~ 80 cm soil layer under different treatments with $0.41 < R^2 < 0.61$ and $12 \text{ mm} < RMSE < 21 \text{ mm}$ respectively. Under all treatments, the soil water salinity of 0 ~ 80 cm soil depth was simulated well with $0.53 < R^2 < 0.60$ and $1.37 \text{ g/L} < RMSE < 2.56 \text{ g/L}$. Therefore, the LAWSTAC model can be used for the preliminary prediction and evaluation of the productivity of farmland with complex soil conditions.

Key words: water deficit; water – salt transport; crop growth; LAWSTAC model

0 引言

农业生态水文模型是改善水资源短缺现状和确保作物产量的重要工具^[1-2]。石羊河位于祁连山北麓,是甘肃省河西地区重要的水源。石羊河流域内农田灌溉用水量占供水量的 86.4%,灌溉水利用率在 54.3% ~ 56.4% 之间^[3]。水资源的严重匮乏、农业生产用水严重挤占生态用水致使流域内生态环境恶化,造成地下水位下降、沙尘暴活动频繁、绿洲萎缩等。石羊河流域是制种玉米的重要生产基地,确保制种玉米产量对维持我国粮食安全具有重要意义^[4]。在有限的水资源条件下,通过合理的农艺措施实现农业持续的高产、优质和高效发展,已成为石羊河流域农业发展面临的最为突出的问题。

农作物的灌溉制度是为了满足作物生长耗水需求、保证产量而制定的适时的灌水方案^[5]。大量研究表明^[6-7],适量减少灌溉定额可以节约水资源、提高作物水分利用效率。但也有研究表明,随着水分亏缺程度的加剧,作物的产量和作物水分利用效率呈下降趋势^[8-10]。因此,选择合适的灌水制度对保证产量和有效提高灌水效率至关重要^[4,11-14]。除此之外,根区土壤盐分状况也会对作物产量造成影响^[15]。目前已有许多滴灌条件下水分亏缺对土壤水盐运移影响的研究成果。王峰等^[16]认为,中定额灌溉是实现抑盐、控水、高产、高效的适宜棉花灌溉制度。部分学者认为,滴灌技术使用初期,农田土壤含盐量明显下降,随后缓慢下降,直至稳定在某一范围内^[17-18]。也有学者认为,农田土壤含盐量下降是短期监测的结果,进行多年滴灌的耕地,其土壤各层盐分变化仍需进一步研究^[19-20]。

农业系统模型 EPIC、APSIM、WOFOST 和 DSSAT 等被广泛使用^[21-24],蒸发蒸腾过程中的水分流失会改变土壤剖面中的水分分布,并进一步影响盐分运移。同时,土壤含水率和含盐量是控制作物根系吸水并影响作物生长和产量的两个重要因素^[25-26]。作物生长与土壤水盐动态之间存在强烈的相互作用。因此,研究作物生长过程中常规灌溉与节水灌溉对农田土壤水盐运移的影响尤为重要。

本课题组开发了层状土壤中水分-溶质运移和

作物生长的耦合模型 (Layered soil water – solute transport and crop growth model, LAWSTAC),该模型提供了 8 种不同的导水率半节点平均方法来克服土壤层状结构产生的数值问题,并已在西北旱区春小麦生产中验证了适用性^[1]。尽管模型需要较少的作物数据输入,但仍需在不同水分条件和作物种类下进行验证。因此,本研究以西北旱区制种玉米田间试验观测数据为基础,验证 LAWSTAC 模型对模拟不同灌溉水平下土壤水盐运移与制种玉米生长的适用性,以便更好地了解农业生态水文过程,为农业科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 4—9 月在农业农村部作物高效用水武威科学观测实验站进行。玉米品种为制种玉米 TRF2018,由当地种子公司提供。母本统一于 2018 年 4 月 19 日播种,父本分两批播种,分别于 2018 年 4 月 26 日和 5 月 2 日播种。南北向种植,行距 40 cm,株距 25 cm。采用滴灌灌溉方式,“一带双行”,滴灌带间距 80 cm,滴头间距 30 cm,滴头流量 2.5 L/h。施肥按照当地经验,即播前施 375 kg/hm² 的磷酸二铵和 375 kg/hm² 的氮磷钾复合肥作为基肥,拔节期分 3 次施 525 kg/hm² 的尿素。设置 3 种水分处理:W100、W70、W40,分别为灌溉需水量的 100%、70%、40%。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤含水率与含盐量

利用 TRIME – TDR 型时域反射仪测定试验田土壤体积分含水率,每个小区埋设 3 根 TRIME 管。每 7 d 测 1 次,灌水前后、降雨后各加测 1 次,测点垂向间距 20 cm,测定深度 0 ~ 160 cm。其中 W100 处理由于 TRIME 管理设问题,实测数据存在误差,采用土钻取土干燥法对存在误差的数据进行修正。

制种玉米播种前、收获后和灌水前后进行取土,取土深度为地下 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm,共 6 层,每个小区取 3 个重复;将土样风干、碾碎和过筛 (1 mm),采用 1:5 的土水比配制土壤浸提液,利用 FE38 型

电导率仪测定其电导率,转换为含盐量^[27],公式为

$$S = 0.0275EC_{1:5} + 0.1366 \quad (1)$$

式中 S ——含盐量, g/kg

$EC_{1:5}$ ——电导率, mS/m

脱盐率、积盐率与土壤盐分浓度计算公式分别为

$$\Delta S_d = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Delta S_a = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$S_c = \frac{Sp}{\theta} \quad (4)$$

式中 ΔS_d ——脱盐率, %

ΔS_a ——积盐率, %

S_c ——土壤盐分质量浓度, g/L

S_0, S_1 ——时段初、时段末土壤含盐量, g/kg

ρ ——土壤干容重, g/cm³

θ ——土壤体积含水率, cm³/cm³

1.2.2 制种玉米生长发育指标及观测方法

叶面积指数:叶面积采用卷尺测量,在每个小区随机选取5株,在不影响其生长的情况下标记,5月22日开始,7 d一周期,叶面积指数计算公式^[28]为

$$LAI = \frac{\sum(LW\beta)}{A} \quad (5)$$

式中 LAI ——叶面积指数, cm²/cm²

L ——叶片长度, cm

W ——叶片最大宽度, cm

β ——折减系数

A ——单个植株所占地表面积, cm²

地上生物量:从5月30日(苗期)开始,每个试验小区随机选取3株制种玉米,取地上部分,将茎、叶、果等分解后,采用干燥法获取其地上生物量,计算公式为

$$B = \frac{\sum(J + Y + Q + G)}{A} \quad (6)$$

式中 B ——地上生物量, t/hm²

J ——玉米茎干质量, g

Y ——玉米叶干质量, g

Q ——玉米叶鞘干质量, g

G ——玉米果实干质量, g

1.2.3 作物耗水量和水分利用效率

灌溉需水量计算公式为

$$I = ET_m - P \quad (7)$$

其中 $ET_m = K_c ET_0$ (8)

式中 I ——灌溉需水量, mm

ET_m ——潜在作物腾发量, mm

ET_0 ——参考作物腾发量, mm

P ——有效降雨量(降雨量大于5 mm), mm

K_c ——作物系数

其中 ET_0 利用联合国粮农组织(FAO)推荐的公式计算^[29], K_c 参考姜雪连^[30]的研究成果。

制种玉米生育期耗水量由水量平衡公式计算,即

$$ET_c = P + \Delta I - \Delta W \pm q - R \quad (9)$$

其中 $\Delta W = W_1 - W_0$ (10)

式中 ET_c ——时段内作物耗水量, mm

ΔI ——时段内灌水量, mm

ΔW ——时段内土壤湿润层内储水量变化量(时段内水量增加时, $\Delta W > 0$), mm

q ——地下水补给量和深层渗漏量,根据当地实际情况,地下水埋深较深(大于30 m),根据灌溉制度,灌水次数多,单次灌水量较少,所以深层渗漏可以忽略, mm

R ——地表径流量,根据实地观测,在作物播种至收获期间,不存在地表径流,所以该项取为零, mm

W_0, W_1 ——时段初、时段末土壤湿润层内储水量, mm

1.3 土壤水盐运移与作物生长耦合模型

1.3.1 LAWSTAC 模型

采用本课题组开发的 LAWSTAC 模型,该模型是以土壤水、盐动态迁移的 Richards 方程、对流弥散方程和作物生长基本原理为基础,利用有限差分方法,动态模拟层状土壤中水分和溶质迁移与作物生长相耦合的农业生态水文模型^[1]。水分运动是盐分运移的主要驱动力,在根系吸水情况下,溶质势的再分布也会影响水分运动,同时,土壤中水盐浓度也会对作物根系吸水和生长产生胁迫,影响作物生长过程中的蒸散发、生物量的形成、干物质分配等,最终影响产量。在实现模型耦合方面,作物生长模块和水盐运移模块互为反馈,水盐运移影响根区水盐分布,影响作物根系吸水和蒸腾,从而影响作物生长和产量。而作物蒸腾及根系发育和冠层叶面积的增长,反过来成为地面和根区的水分运动的汇项,影响水盐运移与分布。由此实现了作物生长模块和土壤水盐运移模块的耦合。

1.3.2 LAWSTAC 模型主要修正参数

采用 W100、W70 和 W40 处理对 LAWSTAC 模型在模拟石羊河流域土壤水盐运移与制种玉米生长的适用性进行分析。考虑设置的3个灌溉水平,选取 W100、W40 处理对 LAWSTAC 模型进行率定,以 W70 处理进行验证模型。模型输入数据包括:气象

数据、土壤参数、作物生长参数、田间管理数据及模型运行初始及边界条件。在参数调整过程中,根据参数参考取值^[22]与实际情况校正模型中的参数,部分参数值如表 1 所示。

表 1 LAWSTAC 模型作物参数

Tab. 1 Main crop parameters in LAWSTAC model

参数	数值
作物生长最低温度 $T_b/^\circ\text{C}$	8.0
作物生长最高温度 $T_0/^\circ\text{C}$	25
消光系数	0.58
VG 根系分布系数	0.75
曲线形状系数 a_{h1}	21.05
曲线形状系数 a_{h2}	60.95
从出苗到叶面积指数开始下降阶段所占生育期的比例	0.62
作物成熟所需最大热量单元(PHU)/ $^\circ\text{C}$	1 800

1.3.3 LAWSTAC 模型验证与评价方法

通过比较不同灌溉水平下土壤贮水量、土壤盐分浓度、制种玉米的 LAI 和地上生物量等参数的模拟值与实测值,来评价模型模拟效果。为了定量描述 LAWSTAC 模型的可靠性,采用模拟值与实测值之间的均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为模型评价指标。其中 RMSE 越小, R^2 越接近 1,说明模拟值的变化趋势与实测值的吻合程度更高。

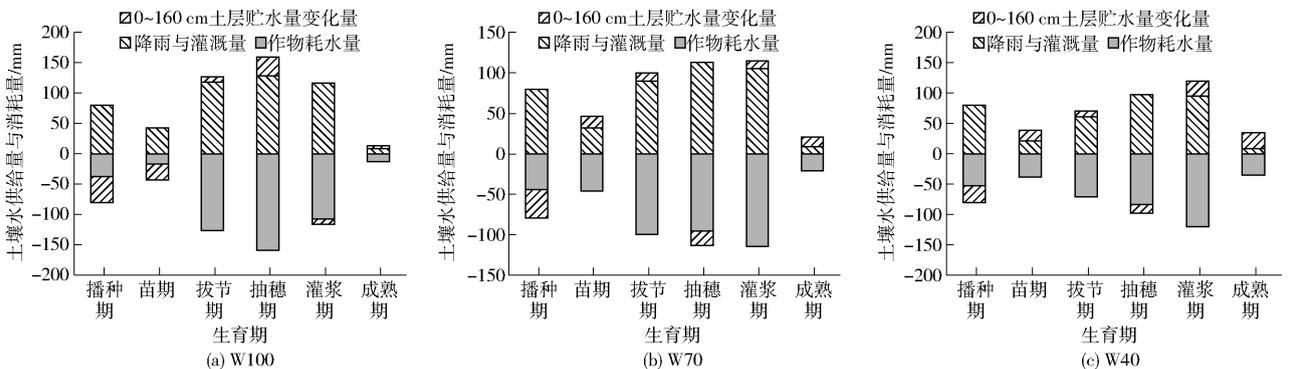


图 1 不同灌溉水平下各生育期 0~160 cm 土层的水分供给与消耗

Fig. 1 Soil water supply and consumption of 0~160 cm soil layer for different growth stages under various irrigation levels

W70、W40 作物耗水量分别为 107、114、120 mm)。制种玉米成熟期,由于降雨量减小且无农业灌溉水,0~160 cm 土层水分对作物耗水的供给量有所增加,超过了降雨与灌溉量,说明土壤水分对作物耗水的补给作用不可忽视,特别是在作物生长后期,土壤水分供给对维持作物的正常耗水起到重要作用。

2.1.2 全生育期 0~80 cm 土层贮水量率定与验证

图 2 为不同灌溉水平下全生育期制种玉米 0~80 cm 土层贮水量的模拟值与实测值的比较结果。0~80 cm 土层贮水量模拟值与实测值的变化趋势基本吻合,在灌溉或者降雨之后,贮水量增加,随后

2 结果与分析

2.1 土壤水分试验结果与模拟

2.1.1 水分亏缺条件下根系层水量均衡分析

图 1 为不同灌溉水平处理下制种玉米不同生育期根区土壤水量,其中,0~160 cm 土层贮水量变化量大于零表示土壤水分减少(被消耗),小于零表示土壤水分增加。在播种后进入苗期之前有一次较大的灌水,这是为保证出苗率,对各处理灌溉了 3 次出苗水(灌溉量依次为 30、30、20 mm),不同处理各次灌溉量均相同。此阶段农田水分输入主要来源于农业灌溉,由于该阶段作物需水量较小,大部分灌溉水以土壤水的形式存储于土壤中。制种玉米拔节期到抽穗期结束期间,作物生长迅速,此阶段需要大量水分,其水分主要来源于灌溉、降雨以及部分土壤水分,充分灌溉(W100)下,作物长势与蒸散发旺盛,土壤贮水量减少以弥补作物耗水需求。由于亏水灌溉下的作物长势较差,蒸散发明显减小,作物耗水量小,又因降雨灌溉,所以土壤贮水量有少量增加的趋势。制种玉米灌浆期,降雨量为 80.8 mm,亏水灌溉下的作物出现雨后复水效应,复水后,作物根系活力、作物生长速率等表现出补偿生长效应^[31],所以后期亏水灌溉的作物耗水量较大(灌浆期 W100、

缓慢减少。各处理 R^2 在 0.41~0.61 之间, RMSE 在 12~21 mm 之间,表明 LAWSTAC 在模拟制种玉米 0~80 cm 贮水量上拟合效果较好。

2.2 土壤盐分试验结果与模拟

2.2.1 单次灌水前后土壤剖面盐分变化

土壤水分是土壤盐分运移的重要载体,土壤中盐分随着土壤水分的运动而迁移,在灌水过程中,盐分随灌溉水以下渗为主,在作物蒸腾和棵间蒸发下,随土壤水分再分布盐分可能滞留根区或向上运移。图 3 为不同灌溉水平下各生育期单次灌水前后土壤剖面盐分变化。图 3a、3b、3c、3e、3i、3k、3l 中,0~

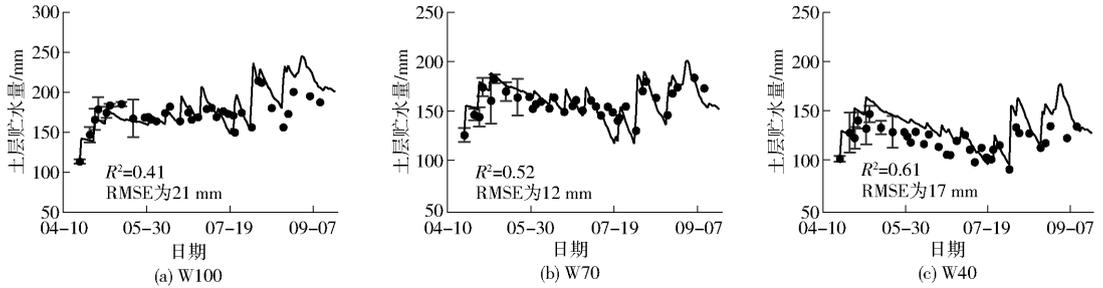


图2 不同灌溉水平下0~80 cm 土层蓄水量的模拟结果

Fig. 2 Simulation results of soil water storage in 0~80 cm soil layer under various irrigation levels

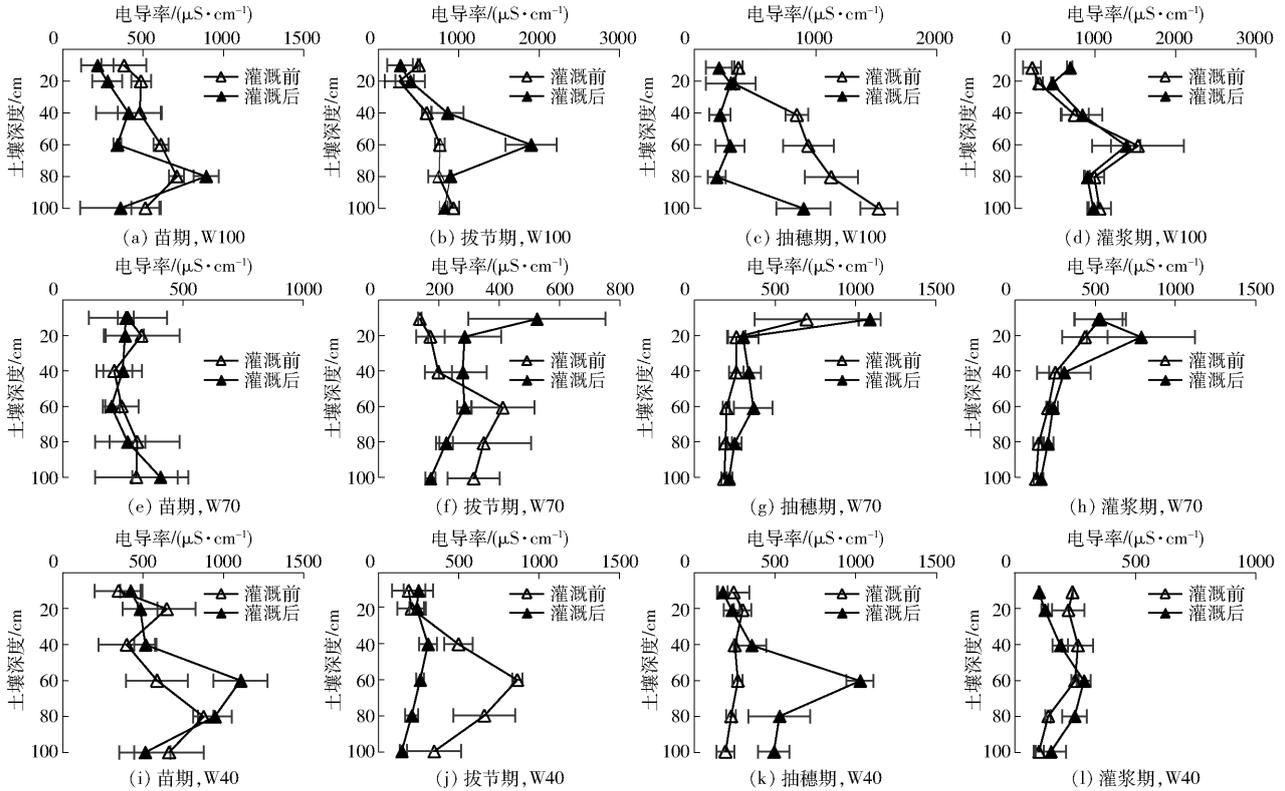


图3 不同灌溉水平下各生育期灌水前后土壤剖面盐分变化

Fig. 3 Variations of soil salinity along soil profile before and after irrigation in different growth stages under various irrigation levels

20 cm 土层灌溉后脱盐,其余处理灌溉后积盐。表2(表中数值小于零表示脱盐,数值大于零表示积盐)为不同灌溉水平下各生育期灌水前后0~20 cm 土层脱盐率与积盐率的定量分析,与图3一一对应。由表2可知,在不同处理下,灌水后表层(0~20 cm)土壤含盐量都有所降低,灌浆期不明显。生育期末

表2 不同灌溉水平下各生育期灌水前后0~20 cm 土层脱盐率与积盐率的定量分析

Tab. 2 Quantitative analysis of desalination and salt accumulation in 0~20 cm soil layer before and after irrigation at various irrigation levels under different growth stages

处理	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	%
W100	-39	-11	-24	103	
W70	-11	123	41	32	
W40	-8	18	-21	-43	

脱盐率依次为49%、49%、25%。灌水量与脱盐率的关系不明显,可能是因为获取其含盐量时,采用选点取土测土壤溶液电导率的方法,无法获得灌水前后土壤含盐量的连续变化。除此之外,虽然选择在垂直滴灌带方向0、10、20 cm处取土取均值,但是滴头的位置对盐分的累积也有较大影响。

2.2.2 全生育期土壤剖面盐分分布

图4为不同灌水量对土壤剖面含盐量的影响,分别选取5月8日(苗期)、6月10日(拔节期)和9月21日(收获期)作为生育前期、中期和末期。随着生育期的推进,0~20 cm 土层剖面含盐量处于脱盐状态,20~100 cm 土层处于积盐状态,充分灌溉W100处理尤为明显,W100处理的脱盐率与积盐率分别为49%和59.2%,W70处理的脱盐率与积盐率分别为49%和18.9%,W40处理的脱盐率与积盐率分别为25%和-14.3%(负值表示脱盐),如图4所

示。充分灌溉处理的脱盐率与积盐率大于严重亏缺灌溉处理,原因是 W100 的灌水量较大,对盐分有一定的淋洗作用。所以,盐分随水分运动向下迁移,经

过全生育期灌水后,灌水量越大,深层积盐越明显,浅层脱盐也越明显,严重亏缺灌溉或是灌水量无法满足作物正常生长发育耗时,其深层积盐效果不明显。

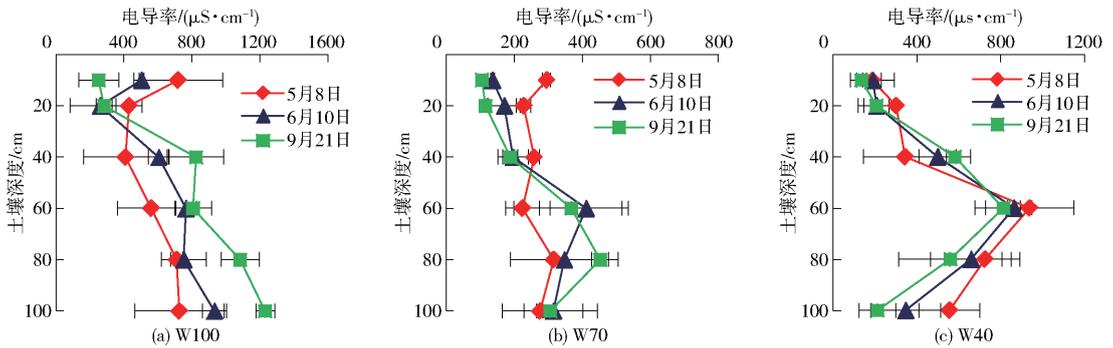


图 4 不同灌溉水平下土壤剖面盐分分布

Fig. 4 Distributions of salinity along soil profiles under various irrigation levels

2.2.3 全生育期 0~80 cm 土层土壤盐分质量浓度率定与验证

图 5 为不同灌溉水平下全生育期制种玉米 0~80 cm 土层土壤盐分质量浓度的模拟值与实测值的比较结果(土壤盐分质量浓度均为 0~80 cm 共 5 个土层的算术平均值)。0~80 cm 土层土壤盐分质量浓度模拟值与实测值的变化趋势基本吻合,各处理 R^2 在 0.53~0.60 之间, RMSE 在 1.37~2.56 g/L 之间,总的来说, LAWSTAC 模型在模拟制种玉米 0~80 cm 土层土壤盐分质量浓度时灌水量较为充分的 W100、W70 拟合效果更好,重度亏水的 W40 模拟效果一般。土壤特性在不同空间位置上存在明显差

异,具有空间变异性^[32],土壤盐分的空间变异受灌溉、施肥等随机因素和土壤母质、地形等非人为的结构性因素的共同影响^[33-34]。其中 W40 是重度亏水的处理,土壤含水率较低,不仅导致实测土壤含水率空间变异大,相应的盐分空间变异更大,而模型反映的是较为理想的平均情况,所以重度亏水的 W40 模拟结果与实测值存在的误差偏大。这与 HAO 等^[35]的研究结果相似,其根据葡萄园土壤含水率空间分布的监测分析表明,土壤水分在较低的情况下具有更强的空间变异性。所以后续应继续开展试验,分析不同灌水处理下土壤水盐的空间变异性,并与数值模拟结果开展对比研究。

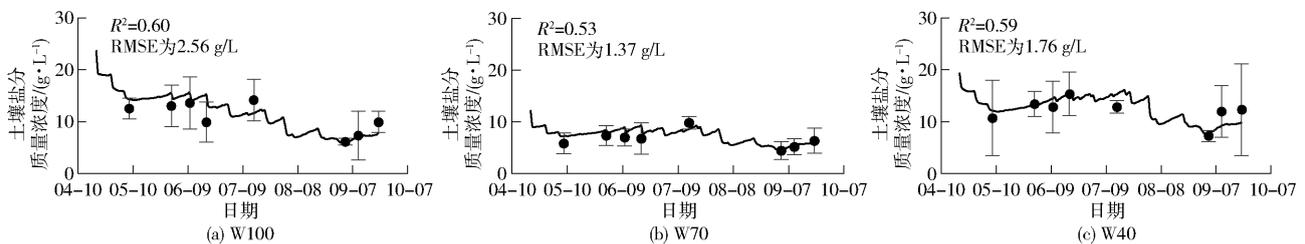


图 5 不同灌溉水平下 0~80 cm 土层土壤盐分质量浓度模拟结果

Fig. 5 Simulation results of soil water salinity in 0~80 cm soil layer under various irrigation levels

2.3 作物生长试验结果与模拟

不同灌溉水平下的制种玉米叶面积指数随生育期的推进呈相同的变化趋势,如图 6 所示。播种后至拔节期快速增大,抽穗期增速减小并趋于稳定,进入灌浆期后,根部叶片脱落,叶面积指数逐渐下降。灌水量越大,制种玉米长势越好,叶面积指数越大,与株高变化呈现相同规律,峰值出现在 W100 (4.51),较其他处理分别提高 36.7% 和 37.7%。整体上看,各处理的决定系数 R^2 均为 0.99, RMSE 为 0.20~0.87 cm^2/cm^2 ,模型对不同灌溉水平下的制种玉米生长模拟效果无明显差异。

图 7 为制种玉米地上生物量的模拟结果,各处

理 R^2 均为 0.99, RMSE 在 1.62~3.57 t/hm^2 之间,其中灌水量较充分的 W100、W70 的模拟效果较优,而重度亏水的 W40 模拟效果较差。在不同处理下,制种玉米地上生物量累积规律基本相同,地上生物量的累积量与灌水量呈正相关关系,随水分亏缺程度的增大逐渐减小。不同灌溉水平下,最终地上生物量分别为 24.25、20.80、15.41 t/hm^2 。W100 处理的地上生物量较其他处理分别提高 16.6% 和 57.3%。其中 W40 处理在整个生育期地上生物量的累积最少,主要可能是水分亏缺程度较大,导致制种玉米生育前期无法达到其生长所需水分,抑制其生长。

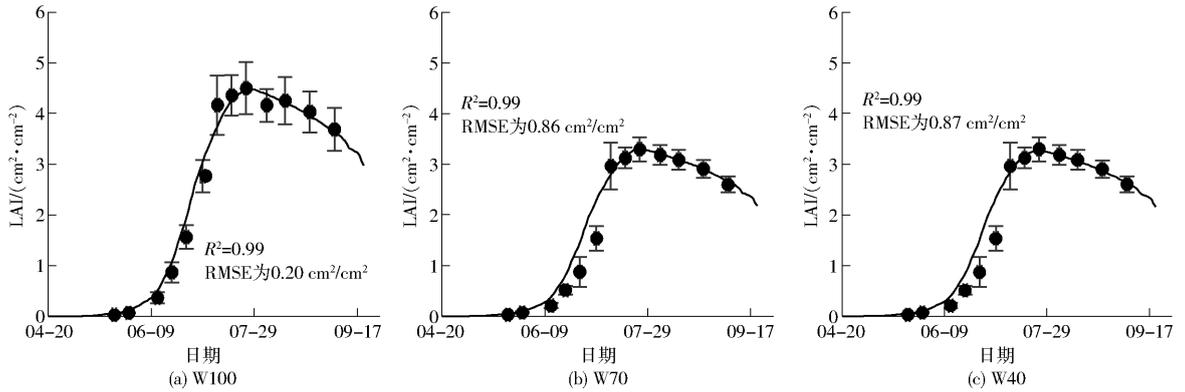


图6 不同灌溉水平下制种玉米 LAI 模拟结果

Fig. 6 Simulation results of seed-maize LAI under various irrigation levels

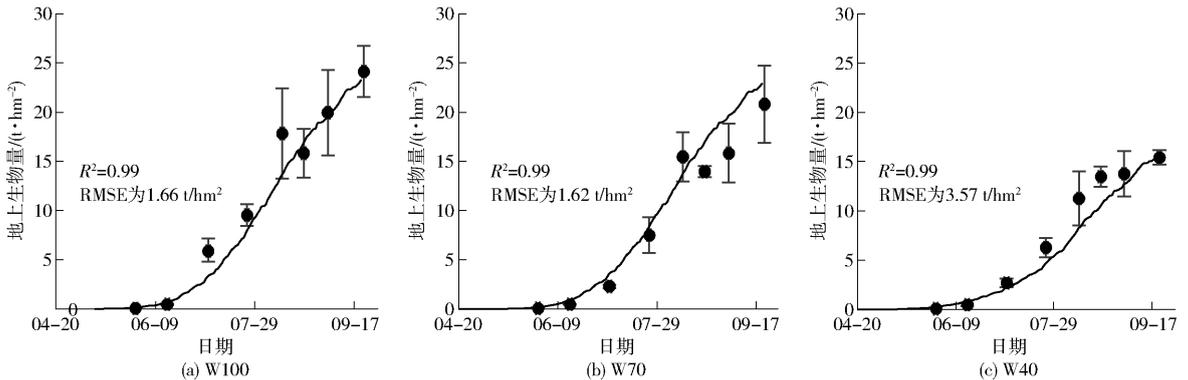


图7 不同灌溉水平下制种玉米地上生物量模拟结果

Fig. 7 Simulation results of biomass of seed-maize under various irrigation levels

3 结论

(1) 在制种玉米生长苗期, 单次灌水后, 浅层 (0 ~ 20 cm) 土壤电导率明显降低, 经全生育期灌溉后, 灌水量越大, 浅层脱盐和深层积盐现象越明显。

(2) W100、W70、W40 水分处理下灌水量越多的

处理, 制种玉米叶面积指数和最终地上生物量累积量越高, 作物长势越好。

(3) LAWSTAC 模型可以较好地模拟石羊河流域制种玉米叶面积指数、地上生物量、0 ~ 80 cm 土层贮水量与土壤盐分质量浓度, 利用 LAWSTAC 模型可为当地玉米农田进行土壤盐分平衡和生产力的初步预测与评估。

参 考 文 献

- [1] CHEN S, MAO X M, BARRY D A, et al. Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221(8):160-174.
- [2] LI Jiang, JIAO Xiyun, JIANG Hongzhe, et al. Optimization of irrigation scheduling for maize in an arid oasis based on simulation-optimization model[J]. *Agronomy*, 2020, 10(7):935.
- [3] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生, 等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [4] 《中国的粮食安全》白皮书(全文)[J]. *黑龙江粮食*, 2019(11):40-47.
- [5] 赵引, 毛晓敏, 段萌. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8):275-284. ZHAO Yin, MAO Xiaomin, DUAN Meng. Effects of film mulching and irrigation amount on farmland water-heat dynamics and growth of seed-maize [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8):275-284. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180832&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.032. (in Chinese)
- [6] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10):1454-1464. ZHANG Xiying. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1454-1464. (in Chinese)
- [7] 宁东峰, 秦安振, 刘战东, 等. 滴灌施肥下水氮供应对夏玉米产量、硝态氮和水氮利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9):28-35. NING Dongfeng, QIN Anzhen, LIU Zhandong, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water and N use efficiency of drip-fertilization summer maize in the North China Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9):

- 28-35. (in Chinese)
- [8] 曹正鹏,刘玉汇,张小静,等. 亏缺灌溉对马铃薯生长产量及水分利用的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(4):114-123. CAO Zhengpeng, LIU Yuhui, ZHANG Xiaojing, et al. Effects of deficit irrigation on growth, yield and water use of potato plants[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(4):114-123. (in Chinese)
- [9] 王晓云,蔡焕杰,李亮,等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学,2019,40(5):2413-2425. WANG Xiaoyun, CAI Huanjie, LI Liang, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Sciences,2019,40(5):2413-2425. (in Chinese)
- [10] 刘战东,张凯,米兆荣,等. 不同土壤容重条件下水分亏缺对作物生长和水分利用的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(2):115-120. LIU Zhandong, ZHANG Kai, MI Zhaorong, et al. Effects of water deficit on crop growth and water use under different soil bulk densities[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(2):115-120. (in Chinese)
- [11] 漆栋良,胡田田,宋雪. 交替隔沟灌溉制度对制种玉米耗水规律和产量的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(14):64-70. QI Dongliang, HU Tiantian, SONG Xue. Effect of irrigation regime on water consumption pattern and grain yield of seed maize under partial root zone irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(14):64-70. (in Chinese)
- [12] 姬景红,李玉影,刘双全,等. 覆膜及膜下滴灌对玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2015(3):22-27. JI Jinghong, LI Yuying, LIU Shuangquan, et al. Effect of plastic film mulch and drip irrigation under plastic film mulch on growth and development of maize and water use efficiency[J]. Water Saving Irrigation, 2015(3):22-27. (in Chinese)
- [13] 于爱忠,柴强. 供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5):778-786. YU Aizhong, CHAI Qiang. Effects of plastic film mulching and irrigation quota on yield of corn in arid oasis irrigation area [J]. Acta Agronomical Sinica, 2015, 41(5): 778-786. (in Chinese)
- [14] 李媛媛,杨恒山,张瑞福,等. 灌溉定额对浅埋滴灌春玉米生长与产量的影响[J]. 水土保持学报,2017,37(2):345-348. LI Yuanyuan, YANG Hengshan, ZHANG Ruifu, et al. Effects of irrigation quota on growth and yield of spring maize under shallow subsurface drip irrigation[J]. Bulletin of Soil Water Conservation,2017,37(2):345-348. (in Chinese)
- [15] 李源,耿庆龙,赖宁,等. 干旱区无覆膜滴灌冬小麦土壤盐分时空演化特征[J]. 干旱区研究,2019,36(3):582-588. LI Yuan, GENG Qinglong, LAI Ning, et al. Spatiotemporal evolution of soil salinity in winter wheat fields with different years of drip irrigation without mulching in arid area[J]. Arid Zone Research,2019,36(3):582-588. (in Chinese)
- [16] 王峰,孙景生,刘祖贵,等. 不同灌溉制度对棉田盐分分布与脱盐效果的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):120-127. WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effect of different irrigation scheduling on salt distribution and leaching in cotton field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(12):120-127. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.020. (in Chinese)
- [17] 李明思,刘洪光,郑旭荣,等. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(22):82-87. LI Mingsi, LIU Hongguang, ZHENG Xurong, et al. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2012, 28(22): 82-87. (in Chinese)
- [18] 李海霞,杨井,陈亚宁,等. 焉耆县滴灌条件下土壤水热盐的动态变化特征[J]. 干旱区地理,2017,40(6):1218-1226. LI Haixia, YANG Jing, CHEN Yaning, et al. Dynamic characteristics of soil water, heat and salt under drip irrigation in Yanqi County[J]. Arid Land Geography, 2017,40(6):1218-1226. (in Chinese)
- [19] 孙贯芳,屈忠义,杜斌,等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报,2017,33(12):144-152. SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12):144-152. (in Chinese)
- [20] 杨宏伟,杨正华,张富仓,等. 膜下滴灌对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J]. 节水灌溉,2017(7):20-27. YANG Hongwei, YANG Zhenghua, ZHANG Fucang, et al. Effect of different irrigation quota on soil water and salt distribution and yield of maize under the condition of drip irrigation under mulch [J]. Water Saving Irrigation,2017(7):20-27. (in Chinese)
- [21] BOOGAARD H L, DIEPEN C A, ROTTER R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5[R]. 1998.
- [22] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Transactions of the ASAE,1989,32(2):497-511.
- [23] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3-4):235-265.
- [24] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agric. Syst., 1996, 50(3):255-271.
- [25] EITZINGER J, TRNKA M, HOSCH J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions[J]. Ecological Modelling, 2004,171(3):223-246.
- [26] 卢佳,邵光成,章坤,等. 水盐胁迫下根系提水作用对土壤盐分与番茄产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):249-257. LU Jia, SHAO Guangcheng, ZHANG Kun, et al. Effects of root hydraulic lift on soil salt and tomato yield under water and salt stress[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):249-257. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200928&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.028. (in Chinese)

- and Tillage Research, 2002, 66(2): 197 – 205.
- [28] 曲晨晓, 王炜. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(5): 349 – 356.
QU Chenxiao, WANG Wei. Mechanisms of water reserved by sand inter-layer in soil profile[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1997, 16(5): 349 – 356. (in Chinese)
- [29] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 34 – 38.
QIAO Hailong, LIU Xiaojing, LI Weiqiang, et al. Effects of straw deep mulching on soil moisture infiltration and evaporation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 34 – 38. (in Chinese)
- [30] 牛健植, 余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 110 – 116, 126.
NIU Jianzhi, YU Xinxiao. Preferential flow and its scientific significance[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 110 – 116, 126. (in Chinese)
- [31] 赵永敢, 王婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109 – 117.
ZHAO Yonggan, WANG Jing, LI Yuyi, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw inter-layer and plastic mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 109 – 117. (in Chinese)
- [32] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1395 – 1403.
WANG Manhua, CHEN Weifeng, SONG Xiliang, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1395 – 1403. (in Chinese)
- [33] 张金珠, 王振华, 虎胆·吐马尔白. 具有秸秆夹层层状土壤—维垂直入渗水盐分布特征[J]. 土壤, 2014, 46(5): 954 – 960.
ZHANG Jinzhu, WANG Zhenhua, HUDAN T. Distribution characteristics of one dimensional vertical infiltration water and salt in layered soil with subsurface straw layer[J]. Soils, 2014, 46(5): 954 – 960. (in Chinese)
- [34] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1101 – 1107.
LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in North Jiangsu Province[J]. Soils, 2013, 45(6): 1101 – 1107. (in Chinese)
- [35] DELGADO I C, SANCHE Z, RAYA A J. Effects of sodium chloride and mineral nutrients on initial stages of development of sunflower life[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(15/16): 2013 – 2027.
- [36] LIU Wenzhao, LI Yushan. Crop yield response to water and fertilizer in loess tableland of China: a field research[J]. Pedosphere, 1995, 5(3): 259 – 266.
- [37] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 117 – 124.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 117 – 124. (in Chinese)

(上接第 255 页)

- [27] 蒋静. 石羊河流域咸水非充分灌溉农田土壤水盐运移试验与模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
JIANG Jing. Experiment and simulation on the field soil water and salt movement under deficit irrigation with saline water in the Shiyang River Basin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [28] LI S E, KANG S Z, LI F, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(11): 1214 – 1222.
- [29] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 1998.
- [30] 姜雪连. 西北旱区制种玉米父母本耗水特性及蒸发蒸腾量估算方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
JIANG Xuelian. Characteristics of water consumption of female and male parents and evapotranspiration modeling of maize for seed production in an arid region of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [31] ACEVEDO E, HSIAO T C, HENDERSON D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status[J]. Plant Physiology, 1971, 48(5): 631 – 636.
- [32] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 30(9): 10 – 21.
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XU Zhirong, et al. Preliminary study on spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 30(9): 10 – 21. (in Chinese)
- [33] 丁邦新, 刘雪艳, 白云岗, 等. 塔河下游典型绿洲灌区土壤盐分空间变异特征[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(2): 264 – 273.
DING Bangxin, LIU Xueyan, BAI Yungang, et al. Spatial variation of soil salinity in the typical oasis irrigation area of the lower reaches of Tarim river[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(2): 264 – 273. (in Chinese)
- [34] LI X D, SHAO M A, ZHAO C L, et al. Spatial variability of soil water content and related factors across the Hexi Corridor of China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 123 – 134.
- [35] HAO X M, QIU Y, FAN Y Q, et al. Applicability of temporal stability analysis in predicting field mean of soil moisture in multiple soil depths and different seasons in an irrigated vineyard[J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125099.