

石羊河流域制种玉米咸淡水轮灌模式的 SWAP 模型模拟

袁成福^{1,2}, 冯绍元^{1,3}, 季泉毅¹, 霍再林³

(1.扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏 扬州 225009;2.江西水利职业学院,江西 南昌 330013;
3.中国农业大学中国农业水问题研究中心,北京 100083)

摘 要:为了探究石羊河流域制种玉米的咸淡水轮灌模式,利用 2014 年田间试验观测资料对 SWAP 模型进行了参数率定和验证,模拟了不同咸淡水轮灌模式下的土壤水盐平衡,并筛选出了较优的咸淡水轮灌模式,预测了较长时期土壤盐分动态变化及制种玉米产量。结果表明:SWAP 模型率定与验证过程中,土壤含水量的均方误差(RMSE)值在 $0.05\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下,平均相对误差(MRE)值在 15% 以下;土壤含盐量的 RMSE 值在 $4.2\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下,MRE 值在 25% 以下;制种玉米产量的 RMSE 值在 $380\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内,MRE 值在 10% 以下,率定和验证后的 SWAP 模型可用于研究区咸水与淡水灌溉的模拟与预测。 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水条件下采用 2 次淡水、1 次咸水和 1 次淡水、2 次咸水的轮灌方式以及 $6.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水条件下采用 2 次淡水、1 次咸水的轮灌方式为研究区制种玉米的较优轮灌模式,这 3 种较优咸淡水轮灌模式下的土壤盐分累积量较少,并且能够提高制种玉米的产量。3 种较优轮灌模式模拟预测结果显示,在模拟期内土壤含盐量增幅不大,能够达到平稳,不会造成土壤盐渍化,制种玉米减产幅度较小,制种玉米产量能够保持平稳。

关键词:咸水;轮灌;制种玉米;SWAP 模型;土壤水盐平衡;石羊河流域
中图分类号:S274.1;S513 **文献标志码:**A

SWAP simulation of rotational irrigation models with saline and fresh water for seed maize in Shiyang River Basin

YUAN Cheng-fu^{1,2}, FENG Shao-yuan^{1,3}, JI Quan-yi¹, HUO Zai-lin³

(1. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;
2. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. Centre for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore rotation irrigation models with saline and fresh water for seed maize in Shiyang River Basin, the SWAP model was calibrated and validated with the field experimental data collected from 2014. The SWAP model was used to simulate soil water and salinity balance under different rotation irrigation models with saline and fresh water. The optimal rotation irrigation models with saline and fresh water for seed maize were screened out by calculating and analyzing soil water and salinity balance. The SWAP model was also predicted long-term effects of soil salt dynamic and seed maize yield. The results showed that the RMSE values were all lower than $0.05\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ and the MRE values were lower than 15% in soil water content calibration and validation. The RMSE values were all lower than $4.2\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ and the MRE values were lower than 25% in soil salinity calibration and validation. The RMSE and MRE values were less than $380\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 10% in seed maize yield calibration and validation, respectively. The SWAP model can be used as a management tool for simulation and prediction of rotation irrigation models with saline and fresh water in the study area. The SWAP model could properly reflect the change tendency of the measured values. The optimal rotation irrigation models were the irrigation of two times of

fresh water and one time of saline water, one time of fresh water and two times of saline water under brackish water irrigation of $3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, and two times of fresh water and one time of saline water under saline water irrigation of $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. These three optimal rotation irrigation models could achieve the aim of reducing soil salt accumulation in soil and improving seed maize yield. The long-term simulation and prediction indicated that soil salt content and seed maize yield could remain relatively stable for simulation period of time in the optimal irrigation models of seed maize. These three optimal rotation irrigation models would not result in soil secondary salinization and small reduction in seed maize production. The optimal irrigation models have guiding significance to effective irrigation of underground saline water in Shiyang River Basin.

Keywords: saline water; rotation irrigation; seed maize; SWAP model; soil water and salinity balance; Shiyang River Basin

甘肃省石羊河流域地处西北干旱内陆区,该地区降雨稀少、气候干燥、蒸发强烈,水资源短缺成为制约该地区农业生产的主要因素之一^[1]。石羊河流域水资源总量为 18.17 亿 m^3 ,地表水资源量为 15.52 亿 m^3 ,地下水资源量为 2.65 亿 m^3 ^[2]。石羊河流域地下水资源存在着不同矿化度的咸水,其中上游地区地下水矿化度为 $0.5 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,中游地区为 $1.0 \sim 3.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,下游地区为 $3.0 \sim 9.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3-4]。在有限的水资源情况下,为了满足农业生产用水需要和充分利用地下水资源,可以将地表淡水资源和地下咸水资源相联合。国内外有关学者对咸水灌溉技术及利用进行了大量研究,实践证明咸水或微咸水灌溉可使部分农作物产量接近或达到淡水灌溉的产量^[5-8]。咸水灌溉的原则是控制土壤中盐分不能超过作物的耐盐度。目前,国内外利用咸水进行农田灌溉,主要有直接利用咸水灌溉,咸水与淡水混合灌溉,咸水与淡水轮灌。不同的咸水灌溉方式,其效果不同。然而,由于野外田间试验受各种因素的制约,很难全面开展各种咸水灌溉的试验,也不易得到不同作物的咸水灌溉利用模式。在田间试验的基础上,应用数学模型来模拟和预测不同咸水灌溉方式下的土壤水盐运移规律及对作物产量的影响,是一种可行的科学研究方法^[9-11]。其中,国内外广泛利用 SWAP 模型来模拟不同咸水灌溉方式下的土壤水盐分布及作物产量,并预测长时期采用咸水灌溉对农田土壤环境的影响。杨树青等^[12]在内蒙古河套灌区利用 SWAP 模型与 Visual ModFlow 相结合,模拟了不同灌溉定额(淋洗和正常)的微咸水灌溉对土壤盐分累积效应以及作物产量的影响,并预测了长时期微咸水灌溉后土壤根系层盐分分布与平衡。王相等^[13]在苏北地区利用 SWAP 模型模拟分析了水稻生育期土壤水盐运移规律和水稻水分利用效率,并预测了长时期采用 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉对土壤盐分分布的影响。唐秀

楠等^[14]在内蒙古河套灌区利用 SWAP 模型模拟了枸杞不同咸淡水轮灌模式下的土壤盐分运移规律及盐分平衡,并预测了长时期咸淡水轮灌方式对土壤环境的影响。Kumar 等^[15]在印度新德里利用 SWAP 模型模拟了小麦不同咸水灌溉条件下根区土壤盐分动态及小麦的相对产量,并预测了小麦长时期咸水灌溉下的相对产量。Jiang 等^[16]在石羊河流域利用 SWAP 模型对春玉米咸水非充分灌溉下土壤水盐分布及春玉米产量进行了模拟,并预测了 10 年间不同土层的土壤水盐分布和春玉米相对产量。石羊河流域由于具有独特的地理气候条件及丰富的光热资源,是我国重要的玉米制种生产基地^[17]。在石羊河流域有关咸水灌溉的利用方式主要是直接利用咸水灌溉,而关于咸水与淡水联合灌溉的研究报道较少。因此,本研究在制种玉米咸水与淡水灌溉田间试验的基础上,利用 SWAP 模型模拟不同咸淡水轮灌下的土壤水盐平衡,并预测较长时期采用咸淡水轮灌模式下的土壤含盐量及制种玉米相对产量,为研究区合理利用地下咸水资源及农业生产实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验

田间试验于 2014 年 4—9 月在甘肃省武威市的中国农业大学石羊河试验站进行,所在经纬度为 $E102^\circ52'$, $N37^\circ52'$,海拔为 1 581 m。该试验站位于甘肃省武威市的石羊河流域中上游区域。该研究区地处西北干旱内陆区,降雨稀少,蒸发强度大,多年平均降雨量为 164.4 mm,多年平均蒸发量为 2 000 mm,研究区地下水位埋深为 48 m。咸水和淡水灌溉试验在试验站内测坑中进行,试验站内共有 9 个测坑,每个测坑的面积为 6.66 m^2 ($3.33 \text{ m} \times 2 \text{ m}$),深度为 3 m,每个测坑之间用混凝土分隔,可防止侧渗。测坑内 0~100 cm 土层的土壤理化性质见

表 1。

根据石羊河流域上、中、下游典型区域的地下水矿化度情况试验设置 3 个处理,分别为 s0(灌溉水矿化度为 $0.71\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,淡水)、s3(灌溉水矿化度为 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和 s6(灌溉水矿化度为 $6.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),每个处理设 3 次重复,共 9 个试验小区,采用随机排列方式布置。试验所用淡水为当地井水,咸水根据当地地下水化学组成,采用质量比为 2:2:1 的 NaCl、MgSO₄ 和 CaSO₄ 混合地下水配制而成。利用管道对试验地进行灌溉,由供水干管引水到田间,再由支管分配到每个测坑,每个支管安装水表,用来控制每次的灌溉水量。

试验作物为当地制种玉米富农 963 号,于 2014 年 4 月 19 日播种,9 月 19 日收获,全生育期 153 d。制种玉米按父本和母本 1:7 的比例方式进行种植,制种密度为每个小区 56 株,制种玉米株距为 25 cm,行距为 35 cm。各处理制种玉米生育期内共灌溉 5 次,灌溉水量与当地实际情况保持一致,其中第 5 次灌溉是为了使制种玉米在成熟期籽粒饱满而进行的灌溉,灌溉制度见表 2。其他各种农艺措施均与当地实际情况保持一致。

试验期间在制种玉米播种前、每次灌溉前后和

收获后通过土钻田间分层取土的方法获取土样,每个小区每次取 1 个取样点,每个取样点均分为 5 层,取土深度分别为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm。采用烘干法测定土壤含水量;田间取完土样后预留部分土样带回实验室,将土样风干,进行研磨和过 1 mm 筛后,采用 SG-3 型电导率仪(SG3-ELK742, Mettler-toledo international Inc., Switzerland)测定土壤饱和浸提液的电导率 $EC_{1:5}$ (单位为 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$),并根据已有换算公式($S=0.0275EC_{1:5}+0.1366$)将 $EC_{1:5}$ 转化为土壤含盐量,其中土壤含盐量 S 的单位为 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ [18]。

在制种玉米出苗后每隔 7~10 d 获取制种玉米不同生育期的株高、叶面积指数、根长分布等资料。制种玉米收获时玉米脱粒和晒干后称重得到每个处理的产量,再折算单位为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量。土壤水分特征曲线参数采用高速离心机测定,利用 van Genuchten-Mulaem 模型对土壤水分特征曲线的参数进行拟合。饱和导水率采用渗透仪(TST-55, China),按常水头法测定,为消除不同温度对饱和导水率大小的影响,换算成 10℃ 时的饱和导水率值。气象数据从试验站内的自动气象站采集获取,2014 年制种玉米生育期内有效降雨量为 141.2 mm。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties								
土层深度 Soil depth /cm	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	黏粒 Clay /%	有机质 Organic content /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤容重 Soil bulk density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持水率 Field capacity /($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 Saturated water content/($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	国际制土壤质地 International soil texture
0~20	61.03	28.43	10.54	2.60	1.49	0.27	0.36	砂壤土 Sandy loam
20~40	58.33	30.45	11.22	2.64	1.54	0.30	0.40	砂壤土 Sandy loam
40~100	53.11	34.14	12.75	5.69	1.55	0.32	0.42	壤土 Clay loam

表 2 各处理灌溉制度

Table 2 Irrigation schedule for each treatment							
处理 Treatment	灌溉水矿化度 Irrigation water salinity /($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	灌水定额 Irrigation water quota/mm					灌溉定额 Total irrigation water quota/mm
		6 月 10 日 Jun. 10	7 月 1 日 Jul. 1	7 月 25 日 Jul. 25	8 月 15 日 Aug. 15	9 月 5 日 Sept. 5	
s0	0.71	120	120	120	105	105	570
s3	3.0	120	120	120	105	105	570
s6	6.0	120	120	120	105	105	570

1.2 SWAP 模型

SWAP(Soil-water-atmosphere-plant)模型是由荷兰 Wageningen 大学开发的一种用于模拟农田尺度下土壤水分、溶质和热量在土壤-植物-大气-作物系统(SPAC 系统)中运移及作物生长过程的综合

模型。该模型的上边界位于植物冠层上方,下边界位于地下水系统(饱和层)的上部,分别考虑大气环境因素和区域地下水动态变化的影响。在非饱和带中,SWAP 模型假定水流运动的主方向是垂直的,水流运动主要按垂直一维运动考虑,在垂直方向

上,SWAP 模型将土层分为不同的单元,在每个单元上,耦合求解水分及溶质运动方程和热量传输方程。该模型在国内外干旱地区或半干旱地区模拟土壤水盐运移及作物生长方面得到了较广泛的应用。

土壤水流采用 Richards 方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); K 为土壤饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); h 为土壤水头 (cm); Z 为垂向坐标 (cm), 向上为正; t 为时间 (d); C 为容水度 (cm^{-1}); S 为作物根系吸水项 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)。

溶质运移采用对流弥散方程:

$$J = qc - \theta(D_{dif} + D_{dis}) \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

式中, J 为总溶质通量浓度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); q 为在边界处的垂向水流通量 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); D_{dif} 为溶质扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); D_{dis} 为溶质弥散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); $\partial c / \partial z$ 为溶质浓度梯度; c 为溶质浓度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

SWAP 模型模拟的作物生长过程是采用 WOFOST 作物生长模型,其中包括详细作物模型和简单作物模型,本研究采用简单作物模型。简单作物模型是静态模型,只描述作物最终产量与水分的关系。简单作物模型计算作物的实际产量与潜在产量的比值为相对产量,运用各生育阶段相对产量连乘的数学模型表示整个生育阶段的相对产量。其计算公式如下:

$$1 - \frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} = K_{y,k} \left(1 - \frac{T_{a,k}}{T_{p,k}} \right) \quad (3)$$

式中, $Y_{a,k}$ 为各生育阶段作物实际产量, $Y_{p,k}$ 为各生育阶段作物最大产量, $T_{a,k}$ 、 $T_{p,k}$ 为各生育阶段实际蒸腾量和最大蒸腾量, $K_{y,k}$ 为各生育阶段产量反应系数, k 为作物不同生育阶段。

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} \right) \quad (4)$$

式中, Y_a 为整个生育阶段累积作物实际产量, Y_p 为整个生育期作物累积最大产量, n 为作物不同生育期阶段的数量。

水盐联合胁迫作用下,SWAP 模型描述的作物根系吸水过程是根据作物潜在根系吸水速率,引入水分胁迫修正系数和盐分胁迫修正系数相乘进行计算。计算公式如下:

$$S_p(z) = \frac{T_p}{D_{root}} \quad (5)$$

$$S_a(z) = a_{rw} a_{rs} S_p(z) \quad (6)$$

式中, $S_p(z)$ 是指作物潜在根系吸水速率 (d^{-1}); T_p 是指潜在腾发速率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); D_{root} 是指作物根系深度 (cm); $S_a(z)$ 是指作物的实际根系吸水速率 (d^{-1}); a_{rw} 是指水分胁迫修正系数; a_{rs} 是指盐分胁迫修正系数。

SWAP 模型需要输入气象数据、灌溉资料、作物生长资料、土壤理化参数和水力特性参数、初始和边界条件、初始压力水头和溶质浓度等资料。输入气象数据包括每天的太阳辐射量、最高温度、最低温度、平均风速、平均湿度和降雨量,气象数据由自动气象站获取;灌溉资料、作物生长资料、土壤理化参数和水力特性参数均采用田间试验实测数据;土壤剖面的初始上边界为气象因素决定的降雨、蒸发、植物蒸腾和灌溉,由于地下水位埋深较大,土壤剖面下边界条件为自由排水边界;初始压力水头由初始土壤含水量通过水分特征曲线换算得到;初始溶质浓度由土壤初始含盐量换算得到。具体有关 SWAP 模型的详细介绍参见 SWAP 模型手册^[19]。

模型模拟值与实测值吻合度采用均方误差 ($RMSE$)、平均相对误差 (MRE) 2 个指标进行评价。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中, N 为观测值的个数, P_i 表示第 i 个模拟值, O_i 表示第 i 个观测值,其中 $RMSE$ 和 MRE 值越小,模型模拟效果越好。

2 SWAP 模型率定与验证

2.1 土壤水分模块的率定与验证

利用研究区实测土壤水盐数据、土壤水力特性参数、制种玉米生长资料、灌溉资料以及气象数据等对 SWAP 模型进行率定和验证。其中以 s3 处理为模型的率定处理,s6 处理为模型的验证处理。图 1 为模型率定和验证时不同土层土壤含水量的模拟值与实测值的比较。从图 1 可以看出,土壤含水量的模拟值与实测值吻合较好,模拟值较好地反映了实测值的变化趋势。表 3 为土壤含水量率定与验证时模拟值与实测值的判别指标。由表 3 可知土壤含水量率定与验证过程中土壤含水量 $RMSE$ 值在 $0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下, MRE 值在 15% 以下,在允许的误差精度范围 25% 之内。率定后得到的土壤水力特性参数见表 4。

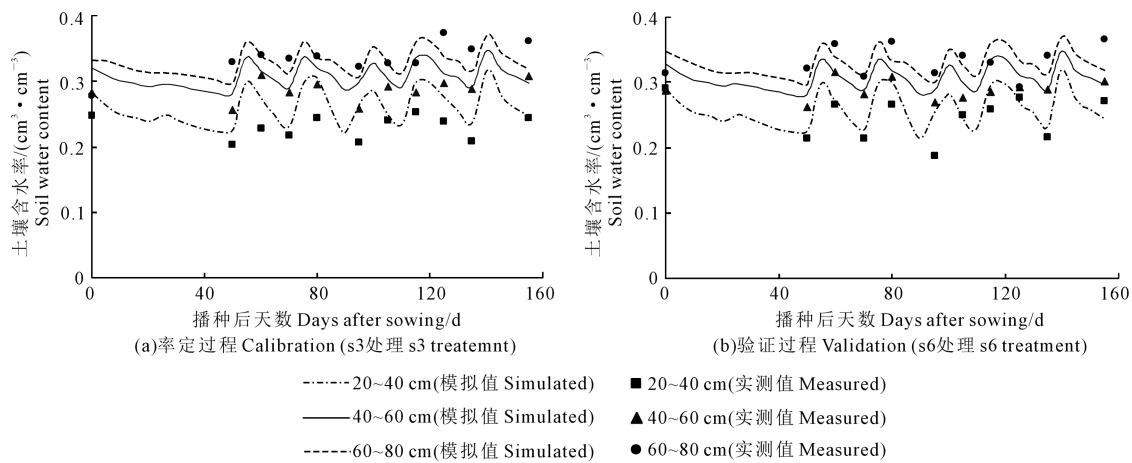


图 1 土壤含水量模拟值与实测值的比较

Fig.1 Comparison of the simulated and measured soil water content in calibration and validation

表 3 土壤含水量模拟值与实测值的 RMSE 和 MRE

Table 3 The RMSE and MRE values of the simulated and measured soil water content

土层深度 Soil depth/cm	率定过程 Calibration		验证过程 Validation	
	RMSE /(cm ³ ·cm ⁻³)	MRE /%	RMSE /(cm ³ ·cm ⁻³)	MRE /%
0~20	0.03	10.58	0.02	7.66
20~40	0.03	9.48	0.04	14.71
40~60	0.02	6.33	0.03	7.63
60~80	0.03	7.73	0.03	7.34
80~100	0.02	3.88	0.03	7.90

2.2 土壤盐分模块的率定与验证

图 2 为模型率定和验证时不同时期土壤含盐量的模拟值与实测值的比较。从图 2 可以看出,不同时期的土壤含盐量的模拟值与实测值吻合较好,模拟值基本上反映了实测值的变化趋势。表 5 为土壤含盐量率定与验证时模拟值与实测值的判别指标。由表 5 可知土壤含盐量率定与验证过程中土壤含盐量 RMSE 值均在 4.2 mg·cm⁻³ 以下, MRE 值均在 25% 以下,在允许的误差精度范围 25% 之内。率定后得到的分子扩散系数和弥散度见表 4。

表 4 率定与验证后的土壤水力特性与溶质运移参数

Table 4 Soil hydraulic parameters and solute transport parameters after calibration and validation

土层深度 Soil depth/cm	残余含水率 Residual water content /(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率 Saturated water content /(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /(cm·d ⁻¹)	曲线形状系数 Shape factor			分子扩散系数 Molecular diffusion coefficient /(cm ² ·d ⁻¹)	弥散度 Dispersion length/cm
				α/cm ⁻¹	n	γ		
0~20	0.055	0.34	30.81	0.024	1.402	0.5		
20~40	0.044	0.36	31.66	0.026	1.408	0.5	0.5	11.0
40~100	0.095	0.39	12.00	0.020	1.310	0.5		

2.3 作物生长模块的率定与验证

SWAP 模型模拟得出的产量结果为相对产量,本研究假定 2014 年试验 s0 处理得到的制种玉米产量(6 303.36 kg·hm⁻²)为最大实际产量,根据模拟的相对产量与最大实际产量之间的换算可得到各处理的模拟产量。以 s0 处理为模型的率定处理, s3、s6 处理为模型的验证处理,制种玉米产量的率定与检验结果如图 3 所示,制种玉米的产量模拟值与产量实测值基本一致。制种玉米产量的率定与

检验过程中, RMSE 值均在 380 kg·hm⁻² 以内, MRE 值均在 10% 以下,符合误差精度要求。制种玉米产量率定后得到的最小冠层阻力为 60 s·m⁻¹,产生盐分胁迫时土壤含盐量的临界值为 1.7 dS·m⁻¹,盐分胁迫引起的根系吸水系数的变化比率为 4.0%。

上述对 SWAP 模型的率定与验证结果表明,率定参数后的 SWAP 模型能够较好地模拟土壤水盐运动规律,可以用于研究区咸水与淡水灌溉的模拟与预测。

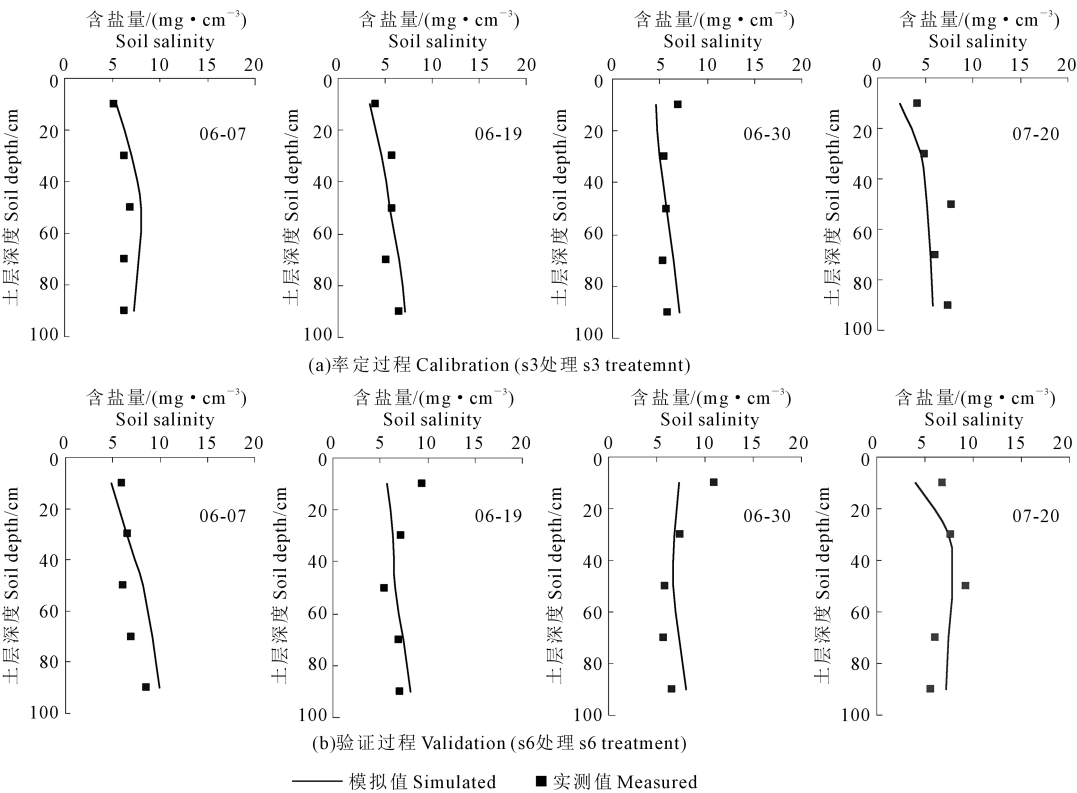


图 2 土壤含盐量模拟值与实测值的比较

Fig.2 Comparison of the simulated and measured soil salinity in calibration and validation

表 5 土壤含盐量模拟值与实测值的 RMSE 和 MRE

Table 5 The RMSE and MRE values of the simulated and measured soil salinity

日期 Date (m-d)	率定过程 Calibration		验证过程 Validation	
	RMSE /(mg·cm ⁻³)	MRE/%	RMSE /(mg·cm ⁻³)	MRE/%
06-08	2.125	14.82	3.331	20.71
06-18	1.998	15.46	4.065	19.46
06-28	2.733	17.06	4.173	21.40
07-23	3.266	22.60	3.602	22.60

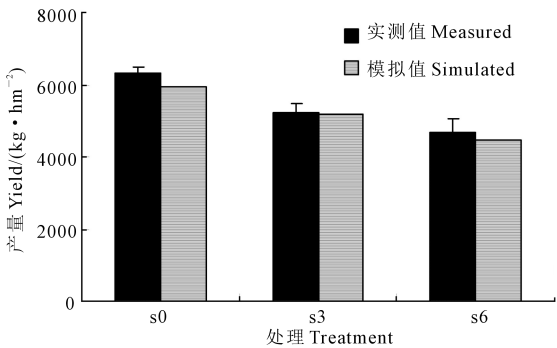


图 3 制种玉米产量实测值与模拟值比较

Fig.3 Comparison of the simulated and measured values for seed maize yield

3 制种玉米咸淡水轮灌模式的 SWAP 模型模拟

3.1 制种玉米咸淡水轮灌模式下的土壤水盐平衡分析

模拟研究采用咸淡水轮灌方式,设置不同的咸淡水轮灌灌溉方案,其中咸淡水轮灌模式是以淡水灌溉制度而拟定。根据当地灌溉经验和前人的研究结果,制种玉米生育期内一般灌溉 5 次或者 4 次,灌溉 5 次主要是为了使制种玉米收获时籽粒饱满,获得更高的产量和经济收入,在制种玉米成熟期增加了 1 次灌溉^[20]。本次模拟不考虑第 5 次灌溉,按照制种玉米生育期内需水量进行灌溉,即生育期内共灌溉 4 次,灌溉定额为 465 mm,其中苗期(6 月 10 日)灌溉 120 mm、拔节期(7 月 1 日)灌溉 120 mm、抽穗期(7 月 25 日)灌溉 120 mm、灌浆期(8 月 15 日)灌溉 105 mm;制种玉米第 1 次灌溉时期为制种玉米苗期~拔节期阶段,该阶段制种玉米抗盐能力较差,为了使制种玉米在生育前期顺利生长,第 1 次灌溉各咸淡水轮灌溉方案均拟定为淡水灌溉,咸淡水轮灌溉只是在第 2、第 3 和第 4 次这 3 次灌水期间进行。因此,根据这 3 次灌水的咸淡水轮灌方式以及考虑 3.0、6.0 g·L⁻¹两种灌溉水矿化度,设置的咸

淡水轮灌方案见表 6,共有 12 种。由于石羊河流域地处于干旱荒漠地带,降雨稀少,枯水年份、平水年份和丰水年份降雨量年际之间差别不大,在模拟过程中,气象数据是采用平均年法($P=50\%$),根据 1960–2014 年的降雨资料进行降雨频率分析,得出 $P=50\%$ 的典型年份,对应的年份是 2011 年,制种玉米生育期降雨量为 118.8 mm;初始土壤含水量与土壤含盐量、制种玉米生长资料与 2014 年田间试验实测数据一致;模拟的土层深度为 0~100 cm。根据上述条件,利用率定好的 SWAP 模型分别对 12 种咸淡水轮灌灌溉方案进行模拟,表 6 为模拟不同咸淡水轮灌方案的土壤水盐平衡计算结果。以土体盐分增

加量最少和制种玉米产量最高为原则,进行较优咸淡水轮灌模式的筛选。从表 6 可知,3.0 g · L⁻¹的微咸水条件下,2 淡 1 咸轮灌方案中,淡淡咸模式下的土体盐分增加量最少,产量最高;2 咸 1 淡轮灌方案中,淡咸咸模式下的土体盐分增加量较少,产量最高。6.0 g · L⁻¹的咸水条件下,2 淡 1 咸轮灌方案中,淡淡咸模式下的土体盐分增加量最少,产量最高;2 咸 1 淡方案下各轮灌模式的土体盐分增加量均较大,不考虑。因此,3.0 g · L⁻¹微咸水条件下,采用淡淡咸和淡咸咸两种咸淡水轮灌模式为较优轮灌模式,6.0 g · L⁻¹咸水条件下,采用淡淡咸的咸淡水轮灌模式为较优轮灌模式。

表 6 模拟不同咸淡水轮灌方案的土壤水盐平衡计算结果

Table 6 Simulation of soil water and salt balance for different rotation irrigation models by saline and fresh water										
灌溉水矿化度 Irrigation water salinity /(g · L ⁻¹)	轮灌方案 Rotation irrigation model	水分平衡 Water balance					盐分平衡 Salt balance			产量 Yield /(kg · hm ⁻²)
		灌溉 Irrigation /mm	降雨量-叶面截留量 Rainfall-interception/mm	土壤水分变化量 Soil water change/mm	底部通量 Bottom flux /mm	腾发量 ET/mm	灌溉带入量 From irrigation /(mg · cm ⁻²)	底部通量 Bottom flux /(mg · cm ⁻²)	土体增加量 Increase in soil /(mg · cm ⁻²)	
3.0	淡淡咸 Fresh-fresh-saline	465.0	107.2	-93.7	-110.9	555.0	57.06	-84.21	-27.15	4727.5
	淡咸淡 Fresh-saline-fresh	465.0	107.2	-92.5	-111.9	552.8	60.49	-85.11	-24.62	4664.5
	咸淡淡 Saline-fresh-fresh	465.0	107.2	-92.7	-113.9	551	60.49	-86.86	-26.37	4664.5
	淡咸咸 Fresh-saline-saline	465.0	107.2	-88.0	-112.4	547.8	84.54	-85.57	-1.03	4664.5
	咸淡咸 Saline-fresh-saline	465.0	107.2	-88.2	-114.4	546.0	84.54	-87.35	-2.81	4601.5
	咸咸淡 Saline-saline-fresh	465.0	107.2	-86.9	-115.8	543.3	87.97	-88.72	-0.75	4601.5
	淡淡咸 Fresh-fresh-saline	465.0	107.9	-61.6	-108.8	525.7	88.56	-108.60	-20.04	4601.5
	淡咸淡 Fresh-saline-fresh	465.0	107.9	-61.5	-113.1	521.3	96.49	-112.70	-16.21	4538.4
6.0	咸淡淡 Saline-fresh-fresh	465.0	107.9	-63.4	-118.1	518.2	96.49	-118.30	-21.81	4475.4
	淡咸咸 Fresh-saline-saline	465.0	107.9	-51.8	-115.6	509.1	152.00	-115.30	36.70	4412.4
	咸淡咸 Saline-fresh-saline	465.0	107.9	-53.7	-120.6	506.0	152.00	-121.00	31.00	4349.3
	咸咸淡 Saline-saline-fresh	465.0	107.9	-54.3	-127.3	499.9	160.00	-128.20	31.80	4286.3

注:土壤水分变化量“-”表示土壤水分被消耗,水分底部通量为负表示土壤水分向下渗漏,盐分底部通量为负表示土壤盐分向下运动,土体盐分增加量为负表示土壤盐分被淋洗。

Notes: The “-” of soil water change indicates that soil water content was consumed. The negative sign of bottom soil water flux indicates that soil water was leaking downward. The bottom soil salt flux was negative, which means that soil salinity moved downward. The negative increase of soil salinity means that soil salinity was leached.

3.2 较长时期土壤盐分及制种玉米产量的预测

通过 SWAP 模型对不同咸淡水轮灌方案进行模拟,已经筛选出了研究区制种玉米较优咸淡水轮灌模式,即 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉条件下,采用淡淡咸和淡咸咸两种咸淡水轮灌模式, $6.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水灌溉条件下,采用淡淡咸的咸淡水轮灌模式。但这 3 种较优咸淡水轮灌模式是否可以在研究区进行长时期利用,需要利用 SWAP 模型对长时期利用咸淡水轮灌模式下的土壤盐分及制种玉米产量进行预测。模拟预测时灌溉制度和气象资料不变,以每一年末的土壤水分和盐分模拟结果作为下一年度的初始条件,将上述 3 种咸淡水轮灌模式连续计算 10 年。图 4 为不同咸淡水轮灌模式模拟 10 年间制种玉米生育期结束后的土壤含盐量变化规律。从图 4 可以看出,随着运行年份的增加,3 种轮灌模式下的土壤含盐量均有不同程度的增加,模拟早期土壤含盐量增幅较大,模拟后期土壤含盐量增幅较小。以 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水条件下的淡咸咸轮灌模式为例,第 2 年较第 1 年增加了 $3.535\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,第 3 年比第 2 年增加了 $1.739\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,第 4 年比第 3 年增加了 $0.921\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,第 5 年比第 4 年增加了 $0.436\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,第 6 年比第 5 年增加了 $0.226\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,从第 7 年后土壤含盐量比前一年增加量在 $0.1\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以内,说明随着咸淡水轮灌的长时期进行,土壤含盐量增幅呈现逐渐减小的趋势,土壤含盐量能够达到平稳,不会造成土壤盐渍化。图 5 为不同咸淡水轮灌模式模拟 10 年间制种玉米的产量。由图 5 可以看出,随着运行年份的增加,制种玉米的产量有一定程度的下降,但减产程度较小,以 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 微咸水条件下的淡咸咸轮灌模式为例,第 1 年制种玉米的产量为 $4\,664.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第 2 年制种玉米的产量为 $4\,412.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第 3 年、第 4 年制种玉米的

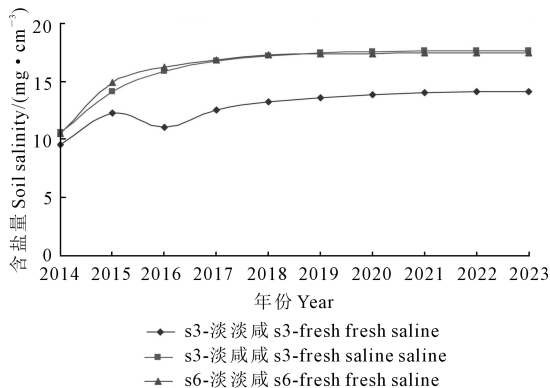


图 4 模拟 10 年内土壤盐分动态变化

Fig.4 Simulation of soil salinity dynamic for 10 years

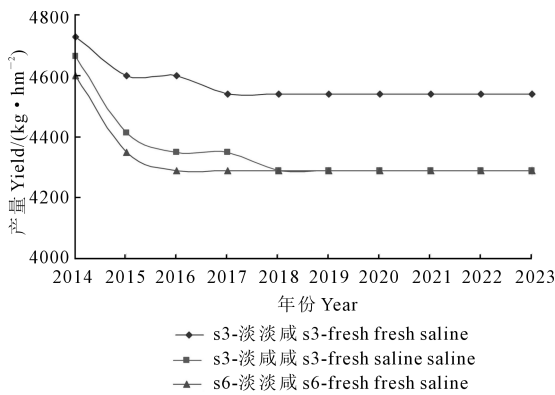


图 5 模拟 10 年内制种玉米产量

Fig.5 Simulation of seed maize yield for 10 years

产量均为 $4\,349.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第 5 年后制种玉米的产量均为 $4\,286.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,制种玉米产量在模拟期第 5 年达到平稳,说明随着咸淡水轮灌的长时期进行,制种玉米的相对产量能够保持平稳,不会造成制种玉米大量减产。

4 讨论与结论

4.1 讨论

王卫光等^[21]提出了适合内蒙古河套灌区条件的咸淡水轮灌方式作为指导灌溉方案,灌溉次数为 3 次,即分别在春小麦分蘖期、拔节期和灌浆期进行灌溉。米迎宾等^[22]研究表明在河南东北部地区利用 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水作为小麦和玉米的灌溉用水,最好采用咸淡水交替的方式,综合土壤积盐状况和对作物产量的影响,淡淡咸组合灌溉顺序为最优轮灌方案。杨树青等^[12]研究表明在内蒙古河套地区利用 $3.84\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉,春小麦生育期采用淡咸咸的咸淡水轮灌方案,作物根层土壤积盐量较其他咸淡水轮灌方案更少,对研究区的土壤环境和春小麦产量的影响较小。唐秀楠等^[14]在内蒙古河套地区利用 $3.84\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微咸水作为枸杞的灌溉用水,采用 2 淡 1 咸轮灌方案中,淡淡咸模式在枸杞盛果期盐分较低,对枸杞的产量影响较小;2 咸 1 淡轮灌方案中,淡咸咸模式对枸杞的产量影响较小,并且利用 SWAP 模型预测了淡咸咸轮灌方式 5 年后,土壤盐分增幅不大,能够达到盐分的进出平衡,且 5 年后盐分依然适宜枸杞的生长,不会对枸杞产量造成影响。本研究得到的 3 种较优的咸淡水轮灌模式,在预测 10 年后,土壤含盐量增加较少,能够达到平稳,不会造成土壤盐渍化,制种玉米的减产幅度较小,这与前人研究结果基本一致。

4.2 结论

(1)SWAP 模型参数率定与验证结果表明:土

壤含水量、土壤含盐量和制种玉米产量的模拟值与实测值吻合度较好,率定参数后的 SWAP 模型能够较好的模拟土壤水盐运动规律和制种玉米产量,可以用于研究区咸水与淡水灌溉的模拟与预测。

(2)不同咸淡水轮灌模式下的土壤水盐平衡分析表明:3.0 g · L⁻¹微咸水条件下,采用淡淡咸和淡咸咸两种咸淡水轮灌方案为较优轮灌模式,即 1 水 120 mm(淡水)、2 水 120 mm(淡水)、3 水 120 mm(淡水)、4 水 105 mm(3.0 g · L⁻¹微咸水)和 1 水 120 mm(淡水)、2 水 120 mm(淡水)、3 水 120 mm(3.0 g · L⁻¹微咸水)、4 水 105 mm(3.0 g · L⁻¹微咸水);6.0 g · L⁻¹咸水条件下,采用淡淡咸的咸淡水轮灌方案为较优轮灌模式,即 1 水 120 mm(淡水)、2 水 120 mm(淡水)、3 水 120 mm(淡水)、4 水 105 mm(6.0 g · L⁻¹咸水)。

(3)较长时期土壤盐分动态变化及制种玉米产量预测结果表明:3 种较优的咸淡水轮灌模式在模拟期内随着时间的增加土壤含盐量增加量较少,能够达到平稳,不会造成土壤盐渍化;制种玉米的减产幅度较小,产量能够保持平稳,不会造成制种玉米大量减产。本研究所得到的 3 种较优的咸淡水轮灌模式有待在生产实践中进行进一步验证和补充完善。

参 考 文 献:

[1] 王增丽,栾元利,温广贵,等. 不同灌溉方式下制种玉米叶面积指数、干物质累积与产量研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(6): 27-31.

[2] 马雁萍. 对石羊河流域水资源可持续利用的几点思考[J].中国水利,2018,(5):21-23.

[3] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等. 气候变化和农业发展对石羊河流域地下水位的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(1):121-128.

[4] 冯绍元,蒋静,霍再林,等. 基于 SWAP 模型的春小麦咸水非充分灌溉制度优化[J]. 农业工程学报,2014,30(9):66-75.

[5] Talebnejad R, Sepaskhah A R. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa [J]. Agricultural Water Management, 2015, 159:225-238.

[6] Liu Xiuwei, Til Feike, Chen Suying, et al. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat-summer maize double cropping system in the low plain of North China [J].

Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(12):2886-2898.

[7] Feng Genxiang, Zhang Zhanyu, Wan Changyu, et al.Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system [J]. Agricultural Water Management, 2017, 193:205-213.

[8] 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报,2015,46(12):117-126.

[9] Xu Xu, Huang Guanghua, Zhan Hongbin, et al. Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412:170-181.

[10] Ma Ying, Feng Shaoyuan, Huo Zailin, et al. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 54: 1044-1052.

[11] 杨建国,黄冠华,叶德智,等. 宁夏引黄灌区春小麦微咸水灌溉管理的模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(4):49-56.

[12] 杨树青,叶志刚,史海滨,等.内蒙古河套灌区咸淡水交替灌溉模拟及预测[J].农业工程学报,2010,26(8):8-17.

[13] 王相平,杨劲松,姚荣江,等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报,2014,30(7):54-63.

[14] 唐秀楠,杨树青,苏瑞东,等.内蒙古河套灌区枸杞微咸水利用模式模拟及环境预测[J].节水灌溉,2015,(5):52-56.

[15] Kumar P, Sarangi A, Singh D K, et al. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model [J]. Agricultural Water Management, 2015, 148:72-83.

[16] Jiang Jing, Feng Shaoyuan, Ma Juanjuan, et al. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model [J]. Field Crop Research, 2016, 196:85-97.

[17] 王增丽,冯浩,温广贵.不同水肥调控措施对土壤水分及制种玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(2):152-157.

[18] Wang Qingming, Huo Zailin, Zhang Liudong, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid region of China [J]. Agricultural Water Management, 2016, 163:125-138.

[19] Van Dam J C, Huygen J, Wesseling J G, et al. Theory of SWAP Version 2.0. Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant Environment [R]. Wageningen; Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, 1997.

[20] Jiang Xuelian, Kang Shaozhong, Tong Ling, et al. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 142:135-143.