

石羊河流域咸水灌溉下土壤水盐 动态及春玉米产量模拟

袁成福^{1,2}

(1. 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心, 江西 南昌 330099; 2. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了探究石羊河流域地下咸水资源的利用方式, 利用春玉米咸水灌溉田间试验观测资料对 SWAP (Soil – Water – Atmosphere – Plant) 模型参数进行了率定和检验, 并利用率定参数后的 SWAP 模型模拟了较长时期咸水灌溉对土壤盐分动态及春玉米产量的影响。研究表明: 土壤含水量、土壤含盐量和春玉米产量的实测值与模拟值吻合较好, 均方误差 (*RMSE*) 和平均相对误差 (*MRE*) 均在允许的误差范围之内, 经过率定和检验后的 SWAP 模型可以用于研究区春玉米咸水灌溉的模拟; 较长时期咸水灌溉模拟结果表明, 在模拟期内, 矿化度在 3.0 mg/cm^3 以下的微咸水灌溉土壤盐分累积量在 2.8 mg/cm^3 以下, 春玉米减产幅度在 20% 以内, 矿化度在 6.0 mg/cm^3 以上的咸水灌溉土壤盐分累积量在 4.0 mg/cm^3 以上, 春玉米减产幅度在 38% 以上。在研究区可以较长时期利用灌水矿化度低于 3.0 mg/cm^3 的微咸水进行灌溉, 土壤积盐量较少, 对春玉米产量影响较小, 可以达到合理利用地下咸水资源的目。

关键词: 咸水灌溉; SWAP 模型; 土壤盐分动态; 春玉米; 产量; 石羊河流域

中图分类号: TV93; S274; S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0239-06

Simulation of soil water – salt dynamic and spring maize yield under saline water irrigation in Shiyang River Basin

YUAN Chengfu^{1,2}

(1. Jiangxi Province Water Resources Planning and Design Institute, Nanchang 330099, China;

2. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to explore the utilization of underground saline water resource in Shiyang River Basin, the soil – water – atmosphere – plant (SWAP) model was calibrated and validated based on field experiments data of saline water irrigation in spring maize field and was used to simulate the long time effect on soil salt dynamic and spring maize yield of saline water irrigation. The results showed that simulated soil water content, soil salinity and spring maize yield agreed well with the measured values. The root mean square error (*RMSE*) and mean relative error (*MRE*) were within the allowable error ranges. The SWAP model could be used to simulate saline water irrigation of spring maize after calibration and validation. The long time simulation results indicated that soil salt accumulation was below 2.8 mg/cm^3 and spring maize yield was reduced by below 20% under brackish water irrigation of 3.0 mg/cm^3 during the simulation period. The soil salt accumulation was above 4.0 mg/cm^3 and spring maize yield was reduced by above 38% under brackish water irrigation of 6.0 mg/cm^3 during the simulation period. Brackish water irrigation of 3.0 mg/cm^3 can be used for irrigation for a relative long duration in the research area, as it has little soil salt accumulation and will not cause significant reduction in spring maize yield. This study has an important significance for saline water irrigation and also guides agricultural production practice.

Key words: saline water irrigation; SWAP model; soil salt dynamic; spring maize; yield; Shiyang River Basin

收稿日期: 2018-09-09; 修回日期: 2018-12-21

基金项目: 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心开放基金项目 (OF201606); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ161471、GJJ161472)

作者简介: 袁成福 (1989-), 男, 江西赣州人, 硕士, 讲师, 研究方向为节水灌溉技术与农业水土环境。

1 研究背景

石羊河流域地处我国西北干旱内陆地区,该地区降水稀少、蒸发强烈,地表水资源极其短缺,但该地区埋藏在浅层地表以下的地下咸水资源储量较大^[1-2]。在淡水资源匮乏的干旱地区,开发利用地下咸水资源,采用咸水灌溉已经成为解决干旱地区水资源短缺问题的重要措施之一^[3-4]。大量研究表明,利用咸水灌溉能够缓解土壤干旱,使部分耐盐作物的产量接近利用淡水灌溉时的产量,与不灌溉相比能够达到增产的目的^[5-6]。但若咸水灌溉利用不当,也会造成土壤盐分持续累积,改变土壤理化性质,使土壤产生次生盐碱化,威胁作物的生长^[7]。如何科学合理、安全有效利用咸水资源进行灌溉一直是研究者所关注的核心问题。众多研究者对咸水灌溉的研究,大多采用室内和田间定位试验的方法来分析咸水灌溉对土壤生态环境及作物生长的影响^[8-10]。然而,由于咸水利用对土壤生态环境和作物生长的影响是一个长期的过程,而野外田间定位试验受外界因素影响较大,长时间进行野外田间试验耗费也大。在田间试验基础上,采用数学模型模拟和预测长期咸水灌溉对土壤生态环境和作物生长的影响,是较为有效和经济的研究方法^[11-13]。其中国内外广泛采用 SWAP 模型来模拟干旱区或半干旱区下土壤水盐运移规律及作物生长过程。SWAP 模型是由土壤水分运移、溶质运移、土壤蒸发、植物腾发、热量传输和作物生长等 6 个模块组成,是宏观 SPAC 系统的集中体现,能够较好地用来模拟田间尺度下土壤-植物-大气环境中土壤水分运移、溶质运移和作物生长,该模型在国内外得到较广泛的接受和认可。Kumar 等^[14]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。杨树青等^[15]在内蒙古河套灌区利用 SWAP 模型模拟了不同灌溉定额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。由于研究区地处西北干旱地区,地下水埋深较大,咸水灌溉后土壤水盐运移是典型的垂直一维运

动,且野外试验是在田间尺度下进行的,能够较好地满足 SWAP 模型的环境条件。本研究在已经进行为期 1 年野外田间试验的基础,为了探究较长时期采用咸水灌溉后土壤盐分动态及春玉米产量情况,引进了 SWAP 模型来模拟研究区咸水灌溉下土壤盐分动态及对春玉米产量的影响,探求较适宜研究区春玉米生长的灌溉水矿化度,所得结果可为研究区合理利用地下咸水资源提供理论依据。

2 田间试验

田间试验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°52'、N37°52',海拔为 1 581 m。该研究区地处我国西北干旱内陆区,降雨稀少,蒸发强烈,年均降雨量为 164.4 mm,年均蒸发量为 2 000 mm,地下水埋深为 48 m。试验在测坑中进行,试验站共有 12 个测坑,每个测坑的面积为 6.66 m² (3.33 m×2 m),深度为 3 m,每个测坑之间用混凝土分隔,可防止侧渗。采用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪分析土壤颗粒组成,土壤容重和田间持水率采用环刀法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。测坑内 0~100 cm 土层的土壤理化性质如表 1 所示。

试验根据石羊河流域上、中、下游及民勤湖区典型区域的地下水矿化度情况设置 4 个处理,分别为 S₀ (灌溉水矿化度为 0.71 mg/cm³,近似为淡水)、S₃ (灌溉水矿化度为 3.0 mg/cm³)、S₆ (灌溉水矿化度为 6.0 mg/cm³) 和 S₉ (灌溉水矿化度为 9.0 mg/cm³),其中灌溉水矿化度采用电导率仪测定,每个处理重复 3 次,共 12 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。试验站具有管道供水到试验地,利用水表精确控制每次灌溉的水量。试验作物为当地春玉米(金穗 1 号),于 2011 年 4 月 22 日播种,9 月 12 日收获,全生育期 143 d。各处理灌溉水量参照当地实际情况,在春玉米生育期内共灌溉 4 次,灌水时间分别为 6 月 6 日、6 月 25 日、7 月 16 日、8 月 13 日,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。

表 1 试验测坑内土壤基本理化性质

土壤深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	田间持水率/%	有机质/(g·kg ⁻¹)	国际制土壤质地分类
0~20	59.56	28.63	11.98	1.49	27.30	2.58	砂壤土
20~60	58.42	29.53	11.23	1.50	29.92	2.62	砂壤土
60~100	43.46	42.74	14.13	1.51	32.29	5.68	黏壤土

表2 各处理灌溉制度

处理	灌溉水矿化度/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	春玉米生育期各处理对应灌水日期的灌水定额/mm				灌溉定额/ mm
		06-06	06-25	07-16	08-13	
S_0	0.71	120	120	120	120	480
S_3	3.0	120	120	120	120	480
S_6	6.0	120	120	120	120	480
S_9	9.0	120	120	120	120	480

试验期间在春玉米播种前、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,取土深度分别为0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm,采用烘干法测定土壤含水率;采用SG-3型电导率仪(SG3-ELK742)测定土壤饱和浸提液的电导率 EC_{15} (单位为 mS/m),根据已有换算公式($S = 0.0275EC_{15} + 0.1366$)将 EC_{15} 转化为土壤含盐量^[16]。在春玉米出苗后每隔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。土壤水分特征曲线参数采用高速离心机测定,VG(van Genuchten)模型水力特性参数利用RETC软件拟合得到。饱和导水率采用渗透仪(TST-55, China),按常水头法测定值。春玉米成熟后每个小区单独收割、脱粒、晒干后称重得到每个处理的产量,然后再折算单位为 kg/hm^2 的产量。气象数据从试验站安装的自动气象站采集获取,春玉米生育阶段内的有效降雨量为110.0 mm。

3 数学模型及模型率定

3.1 SWAP 模型简介

SWAP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SPAC系统中运移及作物生长过程的综合模型。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。该模型主要的计算原理公式如下:

土壤水分运动采用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, cm^3/cm^3 ; K 为土壤饱和导水率, cm/d ; 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, $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ 。

溶质运移采用对流弥散方程:

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

式中: J 为总溶质通量浓度, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$; q 为在边界处的垂向水流通量, cm/d ; c 为溶质浓度, g/cm^3 ; D_{dif} 为溶质扩散系数, cm^2/d ; D_{dis} 为溶质弥散系数, cm^2/d ; $\partial c/\partial z$ 为溶质浓度梯度, g/cm^4 。

SWAP模型的模拟的作物生长过程是采用WO-FOST作物生长模型,其中本研究采用简单作物模型。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, kg/hm^2 ; $Y_{p,k}$ 为各生育阶段作物最大产量, kg/hm^2 ; $T_{a,k}$ 、 $T_{p,k}$ 分别为各生育阶段实际蒸腾量和最大蒸腾量, cm ; $K_{y,k}$ 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, kg/hm^2 ; Y_p 为整个生育期作物累积最大产量, kg/hm^2 ; n 为作物不同生育期阶段的数量。

SWAP模型需要输入气象数据、灌溉资料、作物生长资料、土壤理化参数以及水力特性参数、初始和边界条件、初始压力水头和溶质浓度等资料。具体有关SWAP模型的详细介绍参见SWAP模型理论用书^[17]。模型模拟值与实测值吻合度采用均方误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)2个指标进行评价。

3.2 SWAP 模型率定与检验

应用研究区田间实测数据对SWAP模型进行率定和检验。 S_3 处理为率定过程, S_6 和 S_9 为检验过程。不同土层的土壤含水量的率定与检验结果如图1所示。图1显示,土壤含水量的模拟与实测值

吻合较好,模拟值较好地反映了实测值的变化趋势。土壤含水量率定与检验过程中, $RMSE$ 值在 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下, MRE 值在 20% 以下,符合误差精度要求。率定后得到的 VG 模型水力特性参数见表 3。

不同时期土壤含盐量的率定与检验结果如图 2 所示。 S_3 处理为率定过程, S_6 和 S_9 为检验过程。图 2 显示,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。土壤含盐量率定与检验过程中, $RMSE$ 值均在 $4.5 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 以下, MRE 值均在允许的误差精度范围 25% 之内。率定后得到分子扩散系数为 $0.5 \text{ cm}^2/\text{d}$, 弥散度为 10.0 cm 。

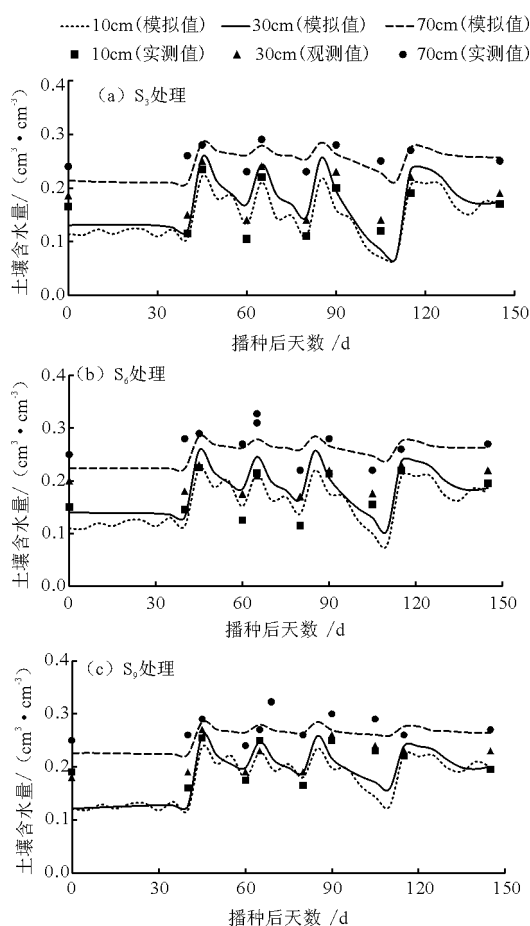


图 1 不同土层深度土壤含水量的率定与检验

SWAP 模型模拟得出的产量结果为相对产量,本研究假定 2011 年试验 S_0 处理得到的春玉米产量 ($10\,572.72 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 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,春玉米产量的率定与检验结果如图 3 所示。图 3 显示,春玉米产量模拟值略小于春玉米实测产量,这主要是由假定估算得到的误差,但春玉米产量模拟值与春玉米实测产量基本一致。春玉米

产量的率定与检验过程中,除了 S_6 处理误差较大外,其余处理的 $RMSE$ 值均在 $2\,200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以内, MRE 值均在允许的误差精度范围 25% 之内。

上述对 SWAP 模型参数的率定和检验结果表明,经过率定和检验参数后的 SWAP 模型可以用于研究区咸水灌溉下土壤盐分动态和春玉米产量的模拟。

4 结果与分析

咸水灌溉对土壤水盐运移及作物生长的影响是一个长期过程,利用率定与检验后的 SWAP 模型模拟较长时期咸水灌溉对土壤盐分动态及春玉米产量的影响。在模拟过程中,气象资料采用研究区 2011–2015 年期间的气象数据,各处理的初始含水量、初始含盐量和灌溉制度不变,以每一年末的土壤含水量和土壤含盐量模拟结果作为下一年度的初始条件,将上述 4 种灌溉水矿化度的咸水灌溉连续运行 5 a。图 4 为这 4 种灌溉水矿化度的咸水灌溉模拟 5 a 内 0~100 cm 土层土壤含盐量动态变化规律。图 4 显示,模型运行 5 a 后 S_0 、 S_3 、 S_6 和 S_9 处理的土壤含盐量分别为 1.88 、 5.93 、 10.82 和 $15.88 \text{ mg}/\text{cm}^3$,分别比试验初始盐分增加了 1.34 、 2.77 、 4.33 和 $5.73 \text{ mg}/\text{cm}^3$,呈现出土壤盐分累积量随着灌溉水矿化度的增加而逐渐增大的趋势,这也说明了较长时期采用咸水灌溉会使土壤盐分逐渐增加。矿化度为 $3.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 以下的微咸水灌溉在模拟期内土壤盐分累积量在 $2.8 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 以下,矿化度为 $6.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 以上的咸水灌溉在模拟期内土壤盐分累积量在 $4.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 以上,高矿化度的咸水长时期灌溉势必会造成土壤盐碱化。

图 5 为 4 种灌溉水矿化度的咸水灌溉模拟 5 a 内春玉米产量的变化规律。图 5 显示,随着模型运行年数的增加,春玉米产量呈现出逐渐减少的趋势,模型运行 5 a 后 S_0 、 S_3 、 S_6 和 S_9 处理的产量分别为 7718.09 、 6343.63 、 4757.72 和 $3171.82 \text{ kg}/\text{hm}^2$,分别比第 1 年模拟的产量减少了 634.36 、 740.09 、 105.73 和 $211.45 \text{ kg}/\text{hm}^2$,这说明随着咸水灌溉的长时期使用,由于土壤盐分逐渐增加,改变土壤环境,会影响作物的生长,使作物造成不同程度的减产。不同灌水矿化度处理的春玉米产量随着灌水矿化度的增加,呈现出逐渐减少的规律,在模拟期内,矿化度为 $3.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 的微咸水灌溉比淡水灌溉减产了 $15.2\% \sim 19.2\%$,矿化度为 $6.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 和 $9.0 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 咸水灌溉的减产幅度分别为 $38.3\% \sim 44.5\%$ 和 $57.5\% \sim 63.2\%$,可见,高灌水矿化度的咸

表 3 率定与检验后的 VG 模型水力特性参数

土层深度/ cm	残余含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	现状系数		
				α / cm^{-1}	n	γ
0 ~ 20	0.012	0.36	105.0	0.126	1.317	0.5
20 ~ 60	0.012	0.38	45.50	0.353	1.265	0.5
60 ~ 100	0.014	0.39	24.95	0.151	1.318	0.5

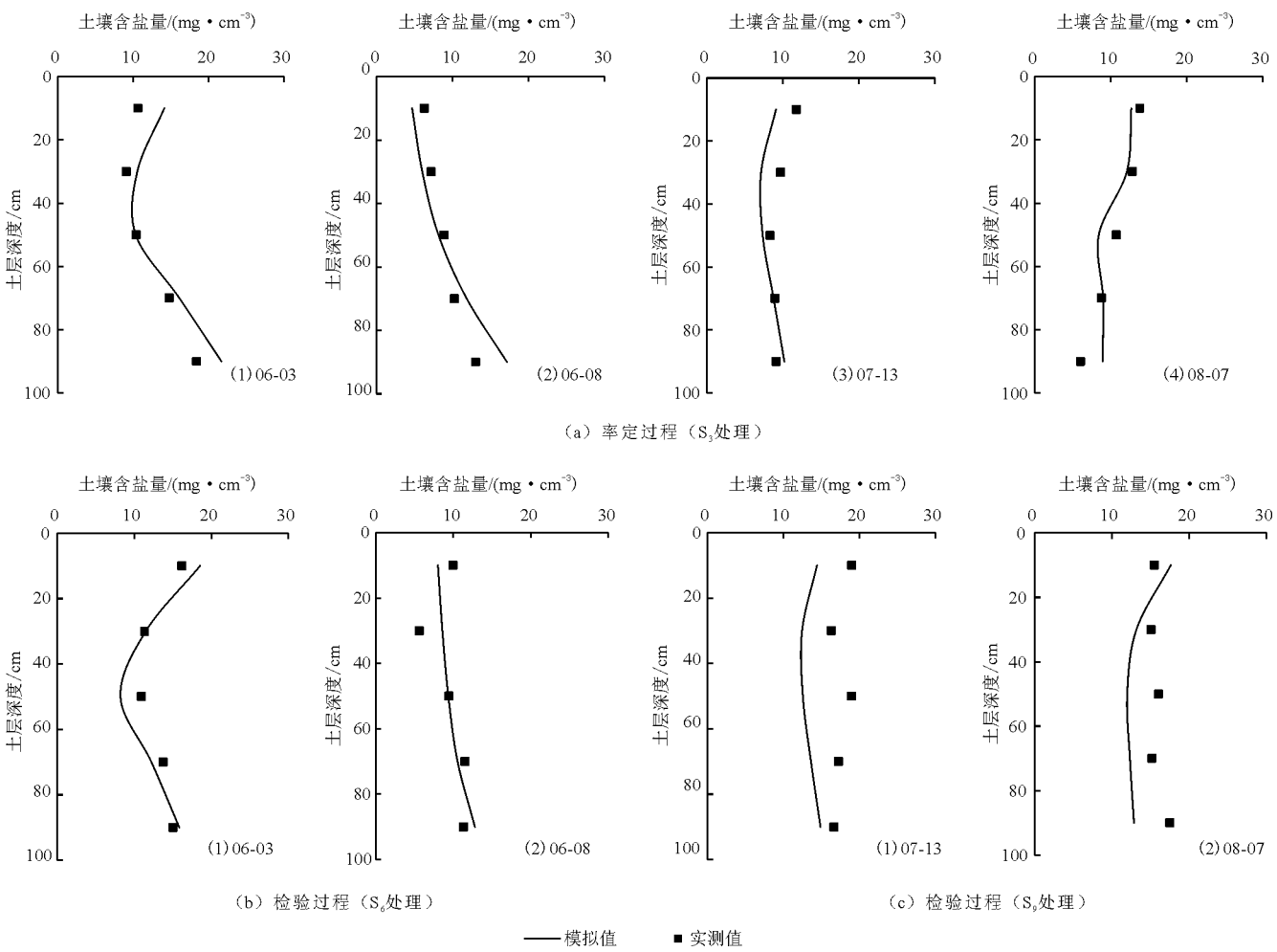


图 2 土壤含盐量的率定与检验曲线

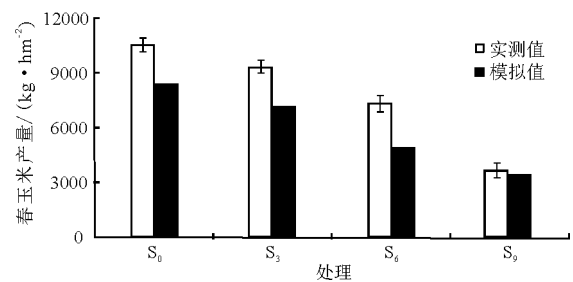


图 3 春玉米产量的率定与检验

水较长时期利用对春玉米产量影响较大,矿化度在 3.0 mg/cm^3 以下的微咸水较长时期利用春玉米的减产幅度在 20% 以内。综上所述,在研究区较长时

期采用灌溉水矿化度为 3.0 mg/cm^3 以下的微咸水灌溉,土壤盐分累积量在 2.8 mg/cm^3 以下,春玉米的减产幅度在 20% 以内,可用于农业生产实践。

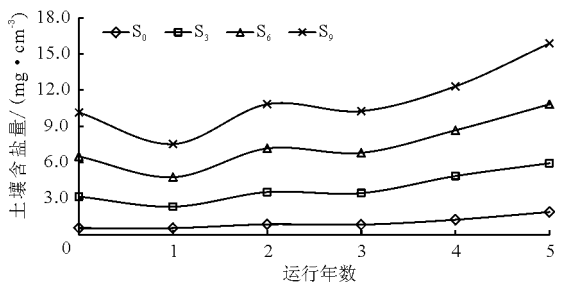


图 4 较长时期土壤盐分动态模拟

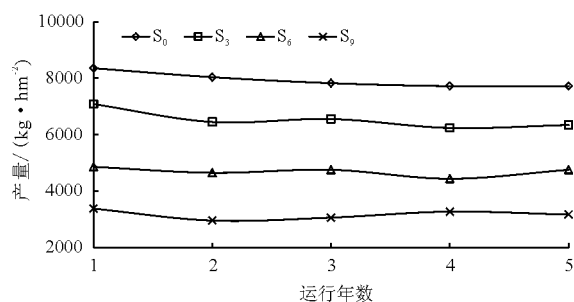


图5 咸水灌溉春玉米产量变化规律

5 结 论

本研究根据石羊河流域春玉米咸水灌溉田间试验观测资料对 SWAP 模型参数进行了率定和检验,并利用率定参数后的 SWAP 模型模拟了较长时期咸水灌溉对土壤盐分动态及春玉米产量的影响,得到的主要结论如下:

(1) SWAP 模型参数的率定和检验结果表明:实测土壤含水量、土壤含盐量和春玉米产量与模型模拟值吻合较好,均方误差 ($RMSE$) 和平均相对误差 (MRE) 均在允许的误差范围之内,率定参数后的 SWAP 模型可用于研究区咸水灌溉下的土壤盐分动态及春玉米产量的模拟。

(2) 较长时期土壤盐分及春玉米产量模拟结果表明:在模拟期内,矿化度在 3.0 mg/cm^3 以下的微咸水灌溉土壤盐分累积量在 2.8 mg/cm^3 以下,矿化度在 6.0 mg/cm^3 以上的咸水灌溉土壤盐分累积量在 4.0 mg/cm^3 以上;与淡水灌溉相比,矿化度在 3.0 mg/cm^3 以下的微咸水灌溉春玉米的减产幅度在 20% 以内,矿化度在 6.0 mg/cm^3 以上的咸水灌溉春玉米减产幅度在 38% 以上。因此,在研究区可以较长时期利用灌水矿化度低于 3.0 mg/cm^3 的微咸水进行灌溉,土壤积盐量较少,对春玉米产量影响较小,可以达到合理利用地下咸水资源的目。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [2] 石媛媛,马国军,王雅云,等. 荒漠绿洲植被生态需水研究现状及发展趋势——以民勤县为例[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(2):34-38.
- [3] 刘春成,李毅,郭丽俊,等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(8):39-45.
- [4] 霍海霞,张建国. 咸水灌溉下土壤盐分运移研究进展与

展望[J]. 节水灌溉,2015(4):41-45.

- [5] 王卫光,王修贵,沈荣开,等. 微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉,2003(2):9-11+46.
- [6] 王毅萍,周金龙,郭晓静. 我国咸水灌溉对作物生长及产量影响研究进展与展望[J]. 中国农村水利水电,2009(9):4-7.
- [7] MONDAL M K, BHUIYAN S I, FRANCO D T. Soil salinity reduction and prediction of salt dynamics in the coastal rice lands of Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1):9-23.
- [8] 郝远远,郑建华,黄权中. 微咸水灌溉对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2016,35(10):36-41.
- [9] 张俊鹏,冯棣,郑春莲,等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(9):161-167.
- [10] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):291-297.
- [11] XU Xu, HUANG Guanghua, ZHAN Hongbing, 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.
- [12] 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(3-4):1044-1052.
- [13] 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.
- [14] KUMAR P, SARANGI A, SINHG 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.
- [15] 杨树青,叶志刚,史海滨,等. 内蒙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.
- [16] 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.
- [17] 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, 19-114.