

基于SWAP模型的河套灌区向日葵 农田土壤水盐通量模拟

袁成福¹, 冯绍元²

(1. 江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了探究河套灌区节水实施现状条件下农田土壤水盐动态变化规律, 利用向日葵田间试验观测资料, 对SWAP模型进行参数率定和验证, 并利用该模型模拟向日葵生长条件下0~100 cm土层土壤水盐通量及水盐平衡状况。研究表明: 在灌溉阶段, 向日葵根系层土壤水分主要向下渗漏, 水分通量和盐分通量为负, 土壤盐分被淋洗; 在非灌溉阶段, 地下水向上补给向日葵根系层土壤, 水分通量和盐分通量为正, 根系层土壤积盐。2019、2020年模拟期间水分通量累计量分别为52.5、60.6 mm, 盐分通量累计量分别为-4.5、-4.9 mg/cm², 0~100 cm土层土壤盐分通量分别增加了7.5、7.1 mg/cm²。向日葵现状灌溉条件下0~100 cm土层土壤积盐, 可能产生土壤次生盐碱化的风险, 向日葵生育期结束后需要进行秋浇淋洗盐分来保证下一年度向日葵的正常生长。

关键词: 土壤水分通量; 土壤盐分通量; SWAP模型; 向日葵; 河套灌区

中图分类号: S274; TV93

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0019-09

Simulation of soil water – salt flux of sunflower farmland in Hetao Irrigation District based on SWAP model

YUAN Chengfu¹, FENG Shaoyuan²

(1. School of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to explore soil water – salt dynamic interactions under the current condition of water-saving implementation in Hetao Irrigation District, the soil – water – atmosphere – plant (SWAP) model was calibrated and validated based on sunflower field experiments data, and then was applied to the simulation of soil water – salt flux and water – salt balance for the 0 – 100 cm soil layer with the plantation of sunflowers. The results showed that the water in the root layer of the sunflower farmland mainly leaked downward in irrigation period, the soil water flux and salt flux were both negative and the soil salt was leached out from this soil layer; whereas in the non-irrigation period, groundwater supplied upward for the water uptake of the roots, so the soil water flux and salt flux were both positive and salt accumulated in this soil layer. During the two-year simulation period, the annual water flux cumulant in the root layer soil reached 52.5 and 60.6 mm, the annual salt flux cumulant reached -4.5 and -4.9 mg/cm², and the annual total soil salt flux increased by 7.5 and 7.1 mg/cm², respectively in the 0 – 100 cm soil layer. Under the current irrigation regime, salt accumulates in the 0 – 100 cm soil layer, which would in turn cause the risks of secondary salinization of soil. So, it is suggested that an extra irrigation should be conducted at the end of sunflower growth period in autumn in order to leach out the soil salt for the growth of the next season of sunflowers.

Key words: soil water flux; soil salt flux; soil – water – atmosphere – plant (SWAP) model; sunflower; Hetao Irrigation District

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-04-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0403301)

作者简介: 袁成福(1989—), 男, 江西赣州人, 博士, 讲师, 研究方向为节水灌溉与农业水土环境。

通讯作者: 冯绍元(1963—), 男, 江西都昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉与水资源及水环境。

1 研究背景

土壤盐分是制约干旱和半干旱地区作物生长及产量的重要因素之一,全球大约有 33% 的耕地出现盐碱化^[1-2]。不合理的灌溉是导致土壤产生次生盐碱化的主要原因之一^[3]。内蒙古自治区的河套灌区是黄河中上游典型的盐碱化特大型灌区,灌区控制面积为 $106.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,设计灌溉面积为 $73.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4]。河套灌区也是我国重要的商品粮油生产基地,农业生产高度依赖于引黄灌溉,是我国典型的“无灌溉则无农业”的地区之一^[5]。河套灌区地下水水位埋深较浅,基本处于 1.5~3.0 m 之间,潜水蒸发作用强,致使下部土壤盐分向表层聚集,造成土壤次生盐碱化^[6]。据调查^[7],全灌区受盐碱化影响的土地面积达 $39 \times 10^4 \text{ hm}^2$,灌区土壤盐碱化严重危害了农作物的生长。近年来,随着河套灌区续建配套与现代化改造项目的实施,灌区引黄水量减少了 20% 以上,用水量由年均 $52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8]。节水改造措施的实施有效降低了灌区的地下水水位,有助于改善土壤盐碱化现状,但同时也导致灌区土壤和地下水以及生态环境发生了变化,灌溉淋洗水量不足导致盐分在土壤表层积累,进一步加大了土壤盐碱化的风险^[9]。因此,研究河套灌区节水实施现状条件下农田土壤水盐运移规律,对灌区防治土壤盐碱化及农业可持续发展具有重要的理论意义。

农田土壤水盐运移的研究方法主要包括野外田间试验和数值模拟等^[10-11]。田间试验往往耗时费力,且仪器设备成本较高,影响试验结果的因素较多,研究结果具有特定性^[12]。在野外田间试验的基础上,利用数值模拟是研究农田土壤水盐运动规律的一种有效方法^[13],目前国内外学者广泛利用 SWAP(soil-water-atmosphere-plant)模型来模拟干旱地区或半干旱地区农田土壤水盐运动规律^[14-16]。Shafiei 等^[17]利用 SWAP 模型模拟了伊朗干旱地区田间试验小区的土壤水分动态和水流通量,结果表明,农田土壤深层向下渗漏的水流通量变化较大,对土壤导水率的影响更为敏感。Jiang 等^[18]利用 SWAP 模型模拟了甘肃省石羊河流域春玉米咸水充分和非充分灌溉下土壤水盐通量的变化,结果表明,充分灌溉的 60 cm 以下土层和非充分灌溉的 30 cm 以下土层水分通量在第 2 次灌水前以向下为主,土壤盐分通量在第 3 次灌水前以向下为主,且向下的土壤盐分通量随着灌溉水量的增加而增大,越多的土壤盐分被淋洗至深层土壤。庄旭东等^[19]利用 SWAP 模型模

拟了河套灌区暗管排水条件下作物根系层土壤水盐通量的变化,结果表明,暗管埋深和间距变化对向上的水分通量影响不大,暗管埋深变化对向下的盐分通量影响较明显。以上利用 SWAP 模型模拟土壤水盐通量变化主要是针对田间试验小区地下水水位埋深较大或是试验小区埋设暗管排水措施的情况,而对现状灌溉条件下大田作物地下水水位埋深较浅且无暗管排水措施下的土壤水盐通量变化的研究较少。向日葵是河套灌区的主要经济作物之一,种植面积达 $27 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占灌区农作物总播种面积的 45%,节水改造实施后向日葵生育期内一般灌溉 1~2 次,灌溉定额为 150~210 mm^[20-21]。研究节水改造实施后向日葵现状灌溉条件下土壤水盐通量变化及土壤盐分累积量,对研究区向日葵的灌溉管理具有一定的指导作用。本研究基于河套灌区永济试验基地 2019—2020 年向日葵田间试验观测资料,对 SWAP 模型参数进行率定和验证,并利用率定后的 SWAP 模型模拟 0~100 cm 土层土壤水盐通量变化,分析研究区向日葵现状灌溉条件下土壤水盐动态与水盐平衡状况,为河套灌区水资源高效利用和土壤盐碱化防治提供理论依据。

2 试验与研究方法

2.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区河套灌区的中国农业大学河套灌区研究院永济试验基地,该基地地处内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区干召镇民主村($107^{\circ}15' \sim 107^{\circ}18' \text{ E}$, $40^{\circ}43' \sim 40^{\circ}46' \text{ N}$)。区域多年平均降水量为 160 mm,多年平均蒸发量为 2 240 mm^[22],地下水水位埋深为 1.6~2.2 m。研究区总面积约为 333.5 hm^2 ,地势整体为东南高西北低,灌溉期间耕地的盐分随着地下水排泄至低洼的盐荒地,南部以合济分干渠为边界,东部以新丈支渠为边界,西南部以新利支渠为边界,西北部以京藏高速公路为边界,北部以乡村道路为边界,可以看作相对独立的灌溉系统。研究区主要种植春玉米、向日葵和蔬菜等作物。研究区位置及作物分布如图 1 所示。

2.2 田间试验与观测项目

田间试验选择在研究区西北部的 3 块向日葵地进行,分别命名为 KH1、KH2、KH3,其面积均为 0.667 hm^2 ,3 块向日葵地均靠近农渠,由农渠供水灌溉,灌溉方式为畦灌,在每块向日葵地中间布设地下水观测井,将其相应命名为 1[#]、2[#]、3[#](图 1),每眼观测井深度为 4 m,直径为 10 cm,同时在观测井所

在的向日葵地块内布设土壤采样点,土壤采样点距离观测井 5 m。

野外田间试验于 2019 和 2020 年的 6 月初—9 月底进行,分别在向日葵播种前、生育期两次灌溉前后和秋浇前,采用土钻田间分层的方法从 3 块向日葵地获取土样,取土深度为 0~100 cm,每个采样点取土重复 3 次。采用烘干法测定土壤含水率。采用电导率仪测定土壤饱和浸提液的电导率 $EC_{1:5}$ (dS/m),并根据当地经验公式($S = 2.882EC_{1:5} + 0.183$)将土壤电导率换算成土壤含盐量 S (g/kg)^[23],观测期间每 7 d 采用钢尺水位计测定地下水水位埋深,同时采用自制取水桶取水,再带回实验室过滤澄清后用电导率仪测定地下水的电导率 EC ,并根据当地经验公式($T = 0.64EC$)将地下水电导率换算成地下水矿化度 T (g/L)^[24]。利用激光粒度分析仪测定试验选用向日葵地 0~100 cm 土层的土壤颗粒组成,土壤物理参数如表 1 所示。根据各土层土壤物理性质利用 Rosetta 软件的神经网络土壤传递函数生成各土层土壤水力特性参数,土壤水力特性参数如表 2 所示。

研究区种植的向日葵品种为“美葵 361 号”,6 月初播种,9 月底收获。利用钢卷尺测定研究区向日葵生育期内的株高和叶面积指数,收获时调查和收集向日葵的产量。研究区灌溉水源来源于黄河水,通过灌溉渠道引水至田间,研究区灌区管理部门统一放水,渠道来水后进行灌溉。通过实地调查,向日葵生育期灌溉 2 次,2019 年分别在 7 月 4 日、8 月 1 日灌溉,2020 年分别在 7 月 6 日、8 月 2 日灌溉,每次灌水定额约为 100mm,灌溉水矿化度为

0.5 g/L,试验地块无地表和暗管排水措施。2019—2020 年试验观测期间的气象资料采用中国农业大学河套灌区研究院永济试验基地的气象站观测数据,该两年试验期间的逐日气象资料见图 2。

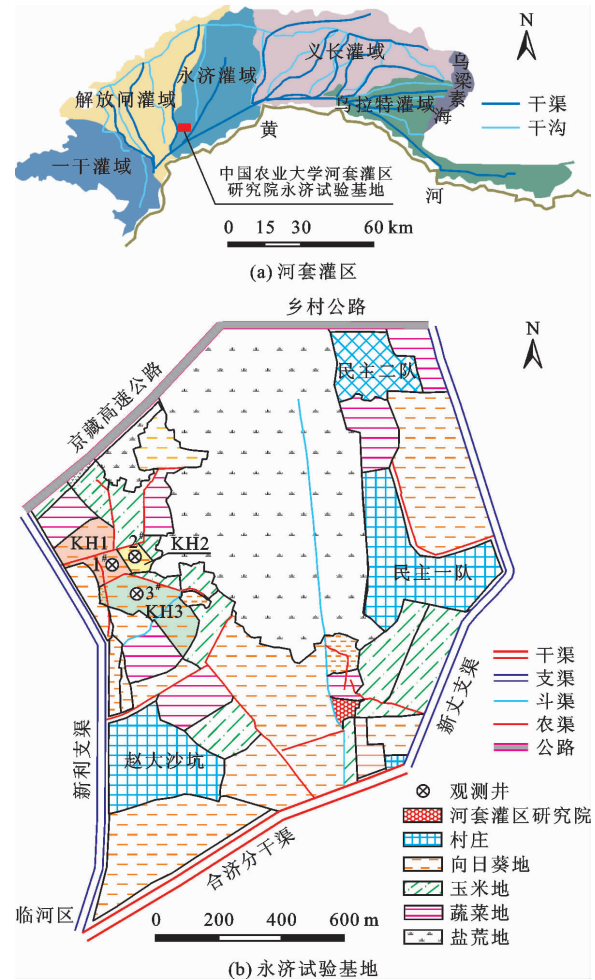


图 1 研究区位置及作物分布示意图

表 1 试验选用向日葵地的土壤物理参数

土层深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	国际制土壤质地分类
0~20	5.02	44.86	50.14	1.68	壤土
20~40	4.97	45.30	49.74	1.58	粉砂质壤土
40~60	4.94	52.35	42.70	1.52	粉砂质壤土
60~100	1.92	21.72	76.72	1.51	砂质壤土

表 2 试验选用向日葵地的土壤水力特性参数

土层深度/cm	残余含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	饱和导水率/(cm·d ⁻¹)	α	n	γ
0~20	0.0328	0.4068	48.71	0.0126	1.4894	0.5
20~40	0.0328	0.4075	49.12	0.0123	1.4940	0.5
40~60	0.0347	0.4185	58.36	0.0076	1.5817	0.5
60~100	0.0306	0.3961	94.63	0.0476	1.5961	0.5

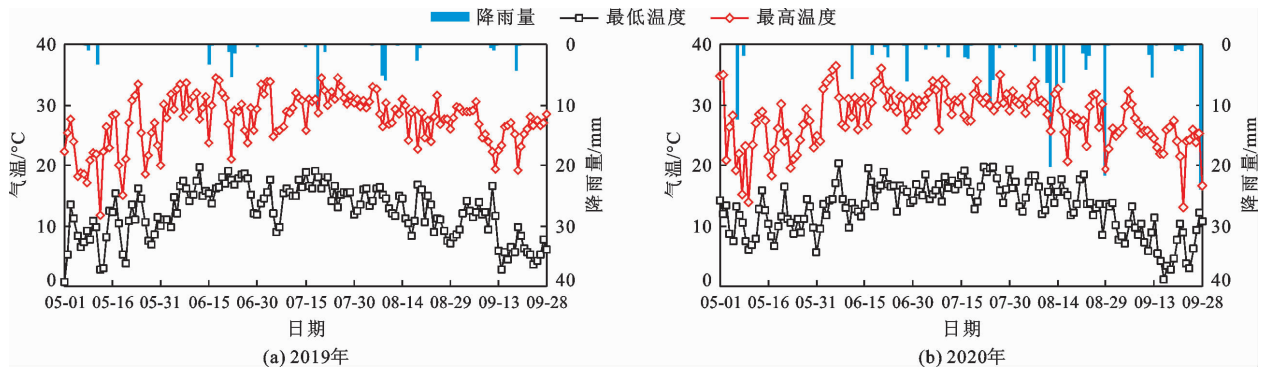


图2 2019—2020年试验期间的逐日气象资料

3 SWAP模型率定与验证

3.1 SWAP模型简介

SWAP模型是由荷兰Wageningen大学集成当今SPAC(soil-plant-atmosphere continuum)系统的理论研究成果,开发的一种用于模拟田间尺度下土壤水分运动、溶质运移与热量传输和作物生长过程的综合模型^[25]。该模型是田间尺度下垂直一维的农业水文模型,广泛用于模拟国内外干旱地区或半干旱地区土壤水盐运动规律和作物生长过程。SWAP模型计算需要对土壤剖面进行空间单元划分,根据研究区土壤质地实际情况以及向日葵根系活动层深度取模拟土柱为0~100 cm,对所选土层共划分为34个单元格。模型上边界条件为气象因素决定的灌溉、降雨、蒸发蒸腾等,选择已知水头 h_{sur} (cm)的一类边界,下边界条件选择给定地下水

水位随时间变化过程 φ_{gw} (cm),地下水水位埋深采用实测值。模型初始条件包括初始水头、初始盐分含量和初始地下水水位埋深及矿化度,均采用田间试验实测数据。模拟值与实测值吻合程度采用均方误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)进行评价。SWAP模型的详细介绍和模型数据的输入参见SWAP模型理论用书^[25]。

3.2 土壤水分模块的率定与验证

试验期间向日葵不同生育时期0~100 cm土层土壤含水率模拟值与实测值的比较如图3所示,图中横线表示标准偏差(下同)。由图3可见,向日葵各生育时期农田土壤含水率模拟值与实测值基本吻合。在率定和验证过程中,向日葵各生育期土壤含水率的 $RMSE < 0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $MRE < 20\%$,模拟效果可行。土壤水分模块率定后的土壤水力特性参数结果如表3所示。

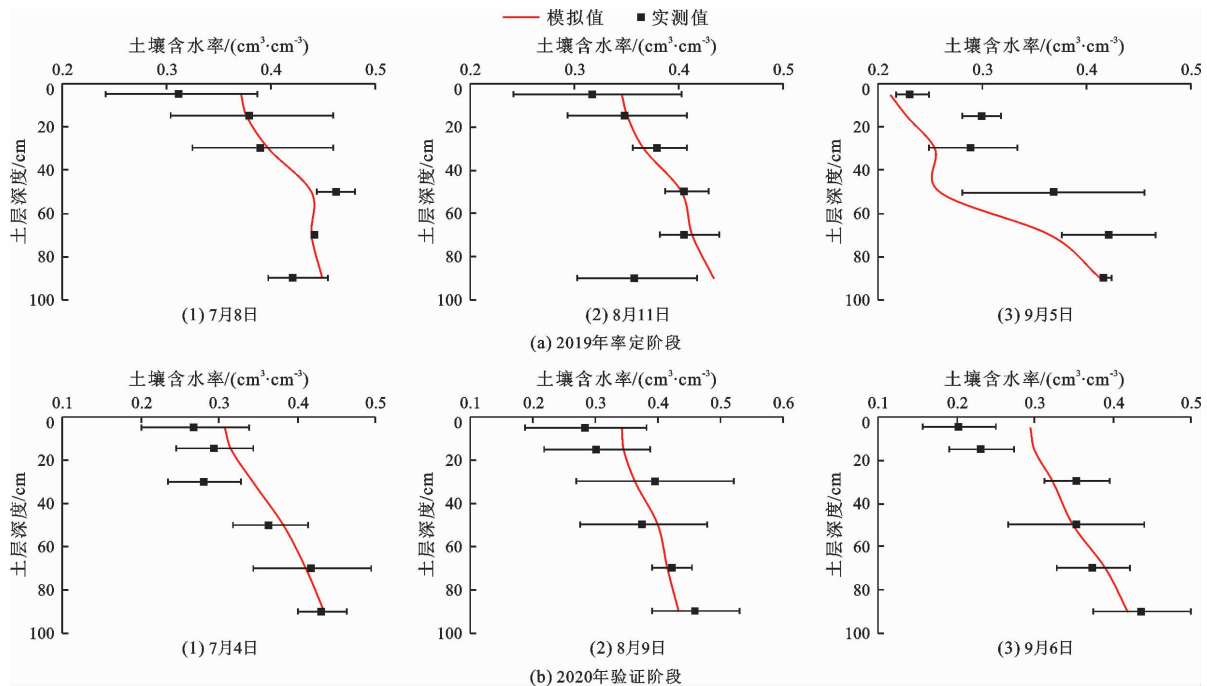


图3 试验期间向日葵不同生育时期0~100 cm土壤含水率实测值与模拟值比较

表 3 模型率定得到的土壤水力特性参数

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/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	α	n	γ
0 ~ 20	0.0328	0.4468	48.71	0.0126	1.1894	0.5
20 ~ 40	0.0628	0.4575	49.12	0.0123	1.1940	0.5
40 ~ 60	0.0347	0.4685	58.36	0.0046	1.2817	0.5
60 ~ 100	0.0306	0.4861	98.63	0.0276	1.0961	0.5

3.3 土壤溶质运移模块的率定与验证

试验期间向日葵不同生育时期 0 ~ 100 cm 土层土壤含盐量模拟值与实测值的比较如图 4 所示。图 4 表明,向日葵各生育时期农田土壤含盐量模拟值与实测值基本吻合,其吻合程度略差于土壤含水率,但土

壤含盐量的模拟值基本上能够反映出实测值的变化趋势。在率定和验证过程中,向日葵各生育期土壤含盐量的 $RMSE < 1.50 \text{ mg/cm}^3$ 、 $MRE < 25\%$,模拟效果可行。土壤溶质运移模块率定后得到的分子扩散系数为 $3.0 \text{ cm}^2/\text{d}$,溶质弥散度为 15 cm 。

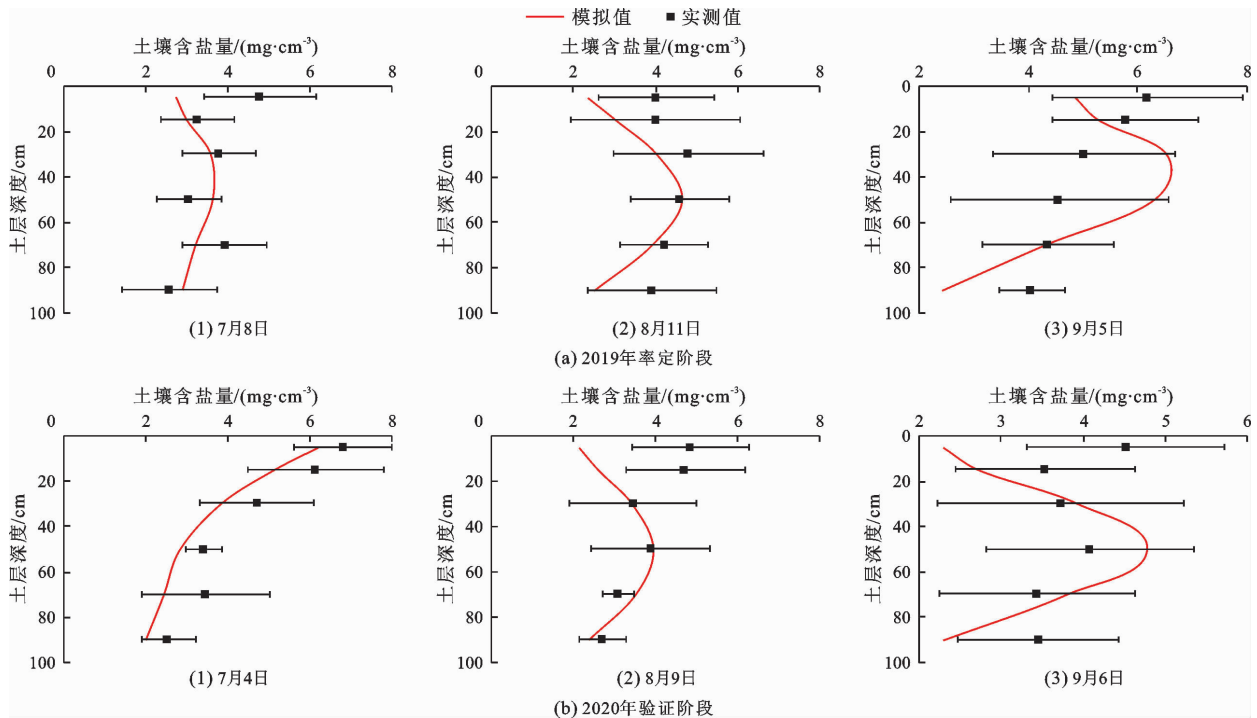


图 4 试验期间向日葵不同生育时期 0 ~ 100 cm 土壤含盐量实测值与模拟值比较

3.4 作物生长模块的率定与验证

中国农业大学河套灌区研究院永济试验基地实测的向日葵最大产量为 5450 kg/hm^2 ^[19],假定研究区实测的向日葵平均产量为可获得的最大产量,根据 SWAP 模型模拟得到的相对产量与最大产量进行换算,可得到模拟产量。向日葵模拟产量与实测产量的比较如图 5 所示。由图 5 可以看出,模拟产量与实测产量基本吻合。在率定与验证过程中,向日葵产量的 $RMSE < 500 \text{ kg/hm}^2$ 、 $MRE < 20\%$,模拟效果可行。

以上 SWAP 模型参数率定与验证结果表明,率定和验证参数后的 SWAP 模型可用于研究区向日葵生长条件下农田土壤水盐通量及水盐平衡的模拟。

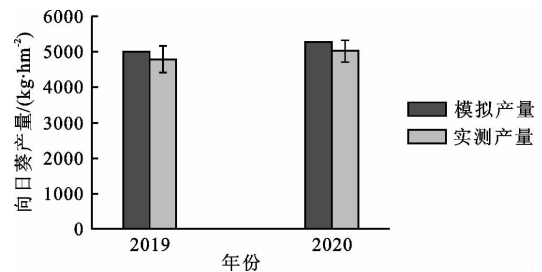


图 5 试验期间向日葵模拟产量与实测产量比较

4 向日葵农田土壤水盐通量与水量平衡模拟

4.1 土壤水分通量模拟结果

向日葵最大根系深度为 90 cm ^[26],本研究模拟

土层深度取为 0 ~ 100 cm 可包括向日葵所有的根系,且 0 ~ 100 cm 也是土壤贮水的主要土层,采用上述率定与验证后的 SWAP 模型,模拟 0 ~ 100 cm 土层的土壤水盐通量。图 6、7 分别为 2019 和 2020 年向日葵生育期内蒸发蒸腾量、土壤剖面 100 cm 深度处土层底部水分通量以及水分通量累计量变化,图中水分通量和水分通量累计量为正、负分别表示土壤剖面 100 cm 以下土层的土壤水分向上运移、向下渗漏(下同),另外,试验区向日葵各生育期为:苗期(5月31日—7月5日)、现蕾期(7月6日—7月24日)、开花期(7月25日—8月6日)、灌浆期(8月7日—8月27日)、成熟期(8月28日—9月28日)。

分析图 6、7 可知,水分通量受作物蒸发蒸腾量、降雨及灌溉量、地下水水位埋深的共同影响,在 2019 和 2020 年两年模拟期间内的向日葵两次灌溉阶段,由于灌溉阶段土壤含水率较大,超过了田间持水率,灌溉水一部分储存在根系层土壤,另一部分则向深层土壤渗漏并补充地下水促使地下水水位上升。例如:2019 年

向日葵第 1 次灌溉后,产生了 39.24 mm 的渗漏量,地下水水位上升了 5.5 cm(图 6(b))。两年模拟期内第 2 次灌溉后向下的水分通量比第 1 次灌溉后的水分通量更小,这是由于第 2 次灌溉处于 8 月初,气温较高,向日葵生长旺盛,作物耗水量较大,灌溉后向下的水分通量较少,两年模拟期间向下的渗漏量分别为 3.32 和 8.98 mm。在非灌溉阶段,由于蒸发蒸腾量较大,向日葵需要吸收更多的水分来满足生长的需要,根系层土壤含水率逐渐减小,深层土壤的水分向上运移补给根系层土壤,水分通量为正,导致地下水水位下降,特别是在向日葵生育后期,地下水水位下降较明显。例如:2019 年第 2 次灌溉后至向日葵生育期结束,地下水水位下降了 69.1 cm。在向日葵全生育期内,两年模拟期的结果均显示水分通量累计量为正,其中 2019 年水分通量累计量为 52.5 mm,2020 年水分通量累计量为 60.6 mm,说明在地下水浅埋深的河套灌区,土壤水与地下水交换频繁,地下水能够向上补给土壤水,以满足向日葵生长的需要。

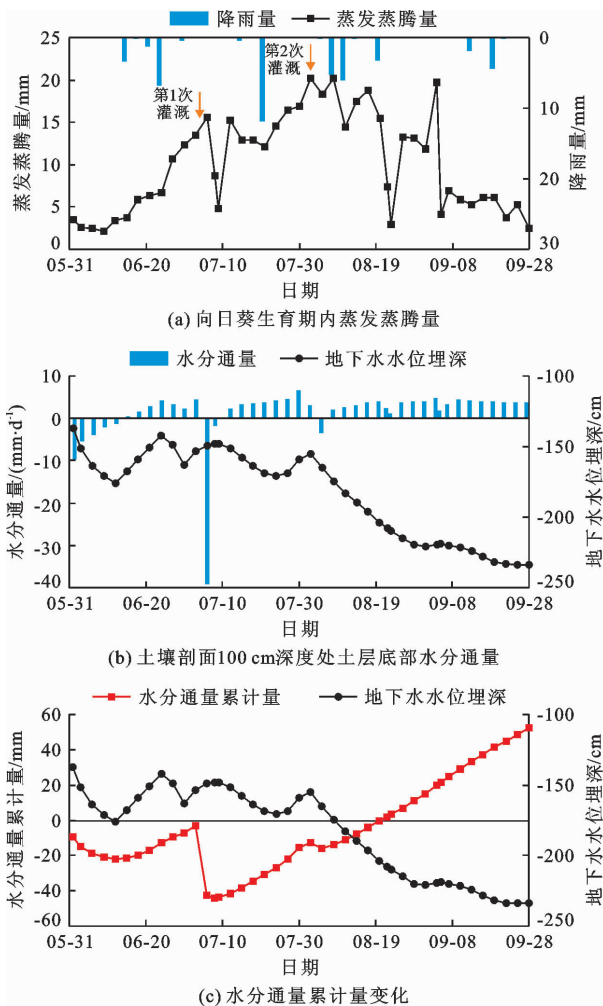


图 6 2019 年向日葵土壤水分通量模拟结果

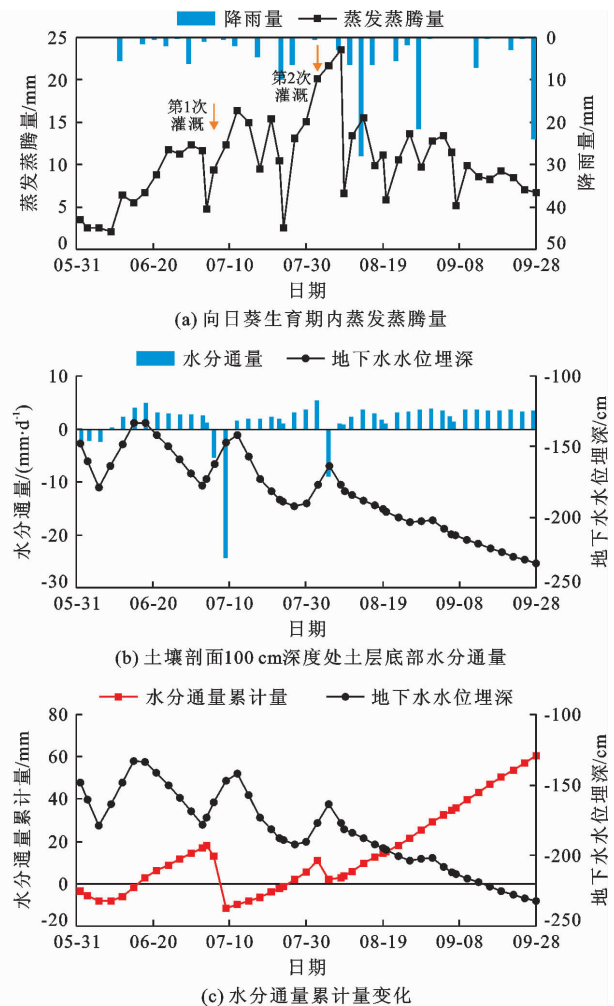


图 7 2020 年向日葵土壤水分通量模拟结果

4.2 土壤盐分通量模拟结果

图 8、9 分别为 2019 和 2020 年向日葵生育期内土壤剖面 100 cm 深度处土层底部盐分通量以及盐分通量累计量变化,图中盐分通量和盐分通量累计量为负表示 0~100 cm 土层土壤盐分向下淋洗。向日葵农田土壤盐分通量具有与水分通量相类似的变化规律。在灌溉阶段,向日葵根系层土壤水分向下渗漏,促使盐分也随着水分向下运移,盐分通量为负,土壤盐分被淋洗。例如:2019、2020 年第 1 次灌溉后盐分淋洗通量分别为 11.6、5.7 mg/cm²。两年模拟期内第 2 次灌溉后向下的盐分通量比第 1 次灌溉后的盐分通量更小,这是由于第 2 次灌溉时向日葵生长旺盛,作物耗水量较大,灌溉后向下的水分通

量较小,因而向下被淋洗的盐分也较少。例如:2019、2020 年第 2 次灌溉后盐分淋洗通量分别为 0.9 与 2.0 mg/cm²。向日葵生育初期,盐分通量也表现出向下被淋洗的现象,这主要是向日葵播种前进行了春灌,受春灌的影响,向日葵生育初期盐分被淋洗。在非灌溉阶段,深层土壤的水分向上运移补给根系层土壤,促使深层土壤的盐分向上运移,盐分通量为正,造成根系层土壤积盐。在向日葵全生育期内,两年模拟期间,盐分通量累计量均为负,其中 2019 年盐分通量累计量为 -4.5 mg/cm²,2020 年盐分通量累计量为 -4.9 mg/cm²,说明向日葵全生育期内两次灌溉带入的盐分能够被淋洗至土壤剖面 100 cm 深度以下的土壤中。

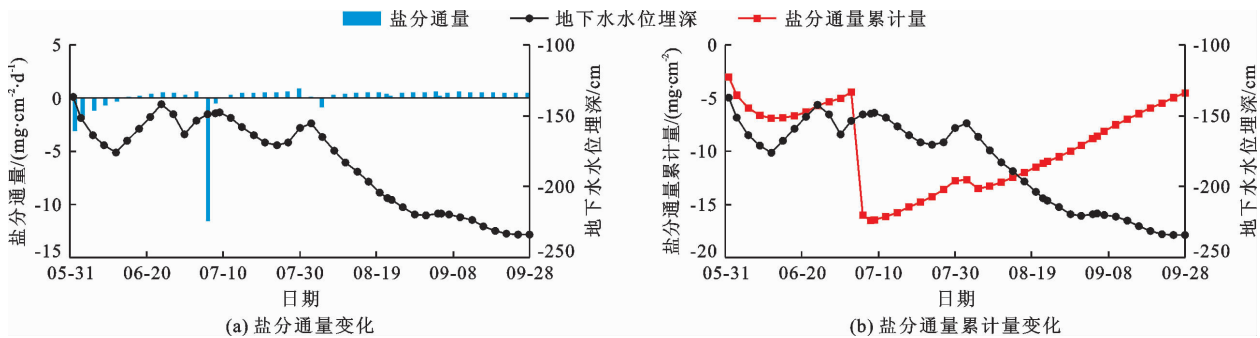


图 8 2019 年向日葵土壤盐分通量模拟结果

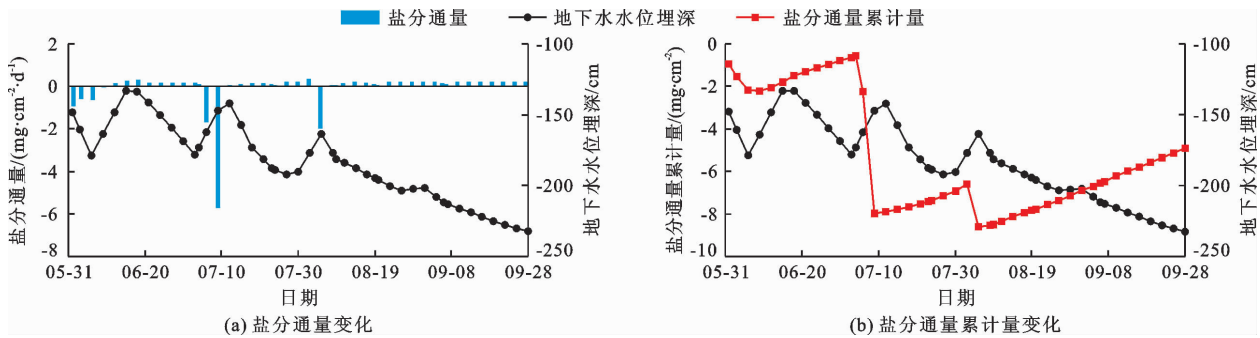


图 9 2020 年向日葵土壤盐分通量模拟结果

4.3 土壤水盐平衡模拟结果

表 4 为 2019 和 2020 年两年模拟期间向日葵土壤水盐平衡模拟结果。由表 4 可知,两年模拟期间,向日葵全生育期内 0~100 cm 土层土壤水分均被消耗,其中 2019 年土壤水分消耗量为 153.1 mm,2020 年土壤水分消耗量为 82.1 mm,说明研究区地下水浅埋条件下,向日葵可以充分利用地下水满足其生长的需要。两年模拟期间,向日葵全生育期内 0~100 cm 土层土壤积盐,在灌溉和降雨作用下,灌溉带入的一部分盐分被淋洗至深层土壤和地下水中,其余盐分则累积在 0~100 cm 土层中,其中 2019 年

土壤盐分通量增加量为 7.5 mg/cm²,2020 年土壤盐分通量增加量为 7.1 mg/cm²。

本研究模拟结果显示,在向日葵整个生育期内,地下水向上运移补充 0~100 cm 土层土壤,2019 和 2020 年地下水向上补充 0~100 cm 土层土壤的水分分别为 52.5、60.6 mm,而 0~100 cm 土层土壤盐分则向下运动,2019 和 2020 年土壤剖面 100 cm 深度处土层底部盐分通量分别为 -4.5、-4.9 mg/cm²,水分通量与盐分通量存在运移方向不一致的情况,这主要是在向日葵春灌和生育期两次灌溉后部分盐分被淋洗至土壤剖面 100 cm 深度以下的

深层土壤和地下水中,而向日葵的平均地下水矿化度为 1.0 g/L,在非灌溉期由地下水向上运移带入到 0~100 cm 土层的盐分相对较少,灌溉与降雨淋洗的盐量大于地下水向上运移携带的盐量。灌溉带入

的盐分除去被淋洗至土壤剖面 100 cm 深度以下土层的盐分外,其余盐分则存留在 0~100 cm 土层土壤中,因此,向日葵全生育期内 0~100 cm 土层土壤为积盐状态。

表 4 2019 和 2020 年向日葵生育期内土壤水盐平衡模拟结果

年份	土壤水分平衡模拟结果					土壤盐分平衡模拟结果			
	灌溉量/ mm	降雨量/ mm	叶面截 留量/mm	蒸发蒸 腾量/mm	水分通 量/mm	土壤水分 变化量/mm	灌溉带入量/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	盐分通量/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	盐分通量变化 量/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
2019	200.0	45.4	7.9	443.1	52.5	-153.1	12.0	-4.5	7.5
2020	200.0	147.2	17.8	472.1	60.6	-82.1	12.0	-4.9	7.1

注:水分通量为正表示地下水向上运动,盐分通量为负表示土壤盐分向下运移,土壤水分变化量为负表示 0~100 cm 土层土壤水分被消耗,土壤盐分通量变化量为正表示 0~100 cm 土层土壤盐分累积。

5 讨论

本研究利用河套灌区节水改造后向日葵现状灌溉条件下的田间试验观测资料对 SWAP 模型参数进行了率定与验证,并应用 SWAP 模型模拟了试验年份向日葵现状灌溉条件下的土壤水盐通量及水盐平衡,模拟结果显示,向日葵现状灌溉条件下生育期内 0~100 cm 土层土壤为积盐状态,向日葵灌溉带入的盐分除去被淋洗至土壤剖面 100 cm 深度以下土层的盐分外,仍有部分盐分存留在 0~100 cm 土层土壤中,说明向日葵现状灌溉条件下会有产生土壤次生盐碱化的风险。因此,研究区在向日葵收获后需要进行大水秋浇压盐来维持河套灌区的盐分平衡,确保下一年度向日葵能够正常生长。在利用 SWAP 模型模拟农田灌溉条件下土壤水盐通量变化时,土壤水分通量与盐分通量方向与地下水水位埋深关系较大,在干旱半干旱地区地下水水位浅埋和深埋情况下,土壤水盐通量表现出不同的规律,在地下水水位埋深较大的干旱地区,土壤水分通量与盐分通量方向一致,而在地下水水位埋深较浅的半干旱地区,土壤水分通量与盐分通量方向相反^[27-28]。河套灌区地下水水位埋深较浅,土壤水与地下水交换频繁,地下水向上运移量大于灌溉与降雨造成的土壤水分渗漏量,因此作物生育期内 0~100 cm 土层底部水分通量向上,而河套灌区土壤为盐碱化土壤,土体本身含有一定量的盐分,其地下水是矿化度为 1.0 g/L 的微咸水,地下水向上运移携带到土壤中的盐分较少,灌溉与降雨淋洗的盐分大于地下水向上运移携带的盐分,因此,作物生育期内 0~100 cm 土层底部盐分通量向下,表现出作物全生育期内

土壤水分通量与盐分通量运动方向相反。综上所述,在地下水水位浅埋深的河套灌区,地下水对土壤水分具有调节作用,制定作物的灌溉制度和防治土壤盐碱化需要充分考虑地下水的影响。本研究主要利用 SWAP 模型模拟试验年份向日葵实际现状灌溉条件下土壤水盐通量变化与水盐平衡状况,没有开展不同水文年份、不同灌溉量、不同排水量、不同地下水水位埋深等不同情景下土壤水盐通量与水盐平衡的模拟,后续可以进一步深入研究。

6 结论

(1)土壤水分通量模拟结果表明:在灌溉阶段,向日葵根系层土壤水分主要向下渗漏,水分通量为负,土壤水补充地下水促使地下水水位上升;在非灌溉阶段,地下水向上补给向日葵根系层土壤,水分通量为正,地下水水位下降;2019、2020 年模拟期间水分通量累计量分别为 52.5、60.6 mm,在地下水浅埋条件下,农田土壤水与地下水交换频繁,向日葵能够充分利用地下水满足其生长的需要。

(2)土壤盐分通量模拟结果表明:在灌溉阶段,向日葵根系层土壤水分向下渗漏,盐分也随着水分向下运移,盐分通量为负,土壤盐分被淋洗;在非灌溉阶段,深层土壤的水分向上运移补给根系层土壤,深层土壤盐分向上运移,盐分通量为正,根系层土壤积盐。2019、2020 年模拟期间盐分通量累计量分别为 -4.5、-4.9 mg/cm^2 ,向日葵全生育期内两次灌溉带入的盐分能够被淋洗至土壤剖面 100 cm 深度以下的土壤中。

(3)土壤水盐平衡模拟结果表明:2019、2020 年模拟期间向日葵 0~100 cm 土层土壤盐分通量分别

增加了7.5、7.1 mg/cm²,说明研究区向日葵现状灌溉条件下全生育期内0~100 cm 土层土壤会发生积盐,可能产生土壤次生盐碱化的风险,因此,在向日葵生育期结束后需要进行秋浇淋洗土壤盐分来保证下一年度向日葵的正常生长。

参考文献:

- [1] 刘燕楠,孙贯芳,毛威,等.基于地统计分析的河套灌区土壤水盐空间变异规律分析[J].灌溉排水学报,2022,41(9):101-109.
- [2] HOSSEYNI - MOGHADDAM M S, SAFAIE N, SOLTANI J, et al. Desert-adapted fungal endophytes induce salinity and drought stress resistance in model crops [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 160: 225 - 238.
- [3] 史海滨,郭珈玮,周慧,等.灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J].农业机械学报,2020,51(4):268-278.
- [4] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究进展[J].灌溉排水学报,2020,39(8):1-17.
- [5] 李泽岩,曹文庚,王卓然,等.内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析[J].现代地质,2022,36(2):418-426.
- [6] 任东阳,徐旭,黄冠华.河套灌区典型灌排单元农田耗水机制研究[J].农业工程学报,2019,35(1):98-105.
- [7] 李仙岳,崔佳琪,史海滨,等.基于指示 Kriging 的土壤盐渍化风险与地下水环境分析[J].农业机械学报,2021,52(8):297-306.
- [8] 孙亚楠,李仙岳,史海滨,等.基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J].农业机械学报,2022,53(12):366-379.
- [9] 化骞寂,冯绍元,葛洲,等.河套灌区典型区周年内耕层土壤盐分时空变异研究[J].灌溉排水学报,2020,39(8):26-34.
- [10] XUE Jingyuan, HUO Zailin, WANG Shuai, et al. A novel regional irrigation water productivity model coupling irrigation-and drainage-driven soil hydrology and salinity dynamics and shallow groundwater movement in arid regions in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(5): 2399 - 2418.
- [11] 黄振宇,夏桂敏,胡家齐,等.基于 AHC 模型的辽西北花生膜下滴灌灌水量优化[J].应用生态学报,2020,31(2):483-492.
- [12] LIU Minghuan, XU Xu, JIANG Yao, et al. Responses of crop growth and water productivity to climate change and agricultural water-saving in arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134621.
- [13] XIONG Lvyang, XU Xu, ENGEL B, et al. Modeling agro-hydrological processes and analyzing water use in a super-large irrigation district (Hetao) of arid upper Yellow River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603 (Part B): 127014.
- [14] PAN Yanxin, YUAN Chengfu, JING Siyuan. Simulation and optimization of irrigation schedule for summer maize based on SWAP model in saline region [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(3): 117 - 122.
- [15] WANG Xiaowen, CAI Huanjie, LI Liang, et al. Estimating soil water content and evapotranspiration of winter wheat under deficit irrigation based on SWAP model [J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9451.
- [16] ZHAO Yin, MAO Xiaomin, SHUKLA M K. A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed-maize growth under film mulching [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292 - 293: 108127.
- [17] SHAFIEI M, GHAHRAMAN B, SAGHAFIAN B, et al. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: a case study in a dry region [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 324 - 334.
- [18] 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.
- [19] 庄旭东,冯绍元,于昊,等. SWAP 模型模拟暗管排水条件下土壤水盐运移 [J]. 灌溉排水学报,2020,39(8): 93 - 101.
- [20] 段玉,张婷婷,曹巨峰,等.河套灌区向日葵有机肥替代化肥施用效果及适宜替代比例研究 [J]. 北方农业学报,2022,50(4):67-73.
- [21] 鲁耀泽,夏玉红,乌兰其其格,等.不同水肥模式对盐渍化农田向日葵生长及产量的影响 [J]. 节水灌溉,2021(7):36-40+45.
- [22] 李焕弟,李江,刘永,等.内蒙古河套灌区土壤性质空间变异性分析——以解放闸灌域和永济灌域为例 [J]. 水资源与水工程学报,2021,32(6):215-221.
- [23] 袁成福,冯绍元,庄旭东,等.内蒙古河套灌区典型耕、荒地水盐动态分析 [J]. 干旱地区农业研究,2022,40(1):76-85.
- [24] LIU Sheng, HUANG Quanzhong, REN Dongyang, et al. Soil evaporation and its impact on salt accumulation in different landscapes under freeze - thaw conditions in an arid seasonal frozen region [J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(2): e20098.

(下转第36页)

- [18] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等. 河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J]. 湖泊科学, 2022,34(3):919-934.
- [19] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [20] QI Yingying, FARNOOSH A, LIN Lu, et al. Coupling coordination analysis of China's provincial water-energy-food nexus[J]. Environment Science and Pollution Research, 2022, 29(16): 23314.
- [21] 高志远,程柳,张小红. 黄河流域经济发展-生态环境-水资源耦合协调水平评价[J]. 统计与决策,2022,38(9):123-127.
- [22] 王成,唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究,2018,37(6):1100-1114.
- [23] 赵良仕,刘思佳. 黄河流域地级市水-能源-粮食系统耦合及空间关联研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(4):14-23.
- [24] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
- [25] 何伟,陈素雪,仇沪毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(6):1208-1219.
- [26] 张玲玲,车力,王宗志,等. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):47-59.
- [27] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1871-1884.
- [28] 王晓宇,袁汝华. 长江经济带水资源开发利用与社会经济协调发展协调演进分析[J]. 软科学,2021,35(11):106-114.
- [29] 张中浩,聂甜甜,高阳,等. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(5):1086-1100.
- [30] 朱振亚,潘婷婷,杨梦斐,等. 水生态文明建设背景下长江经济带水足迹变化研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(6):160-166.
- [31] 邓洪中,张玲. 长江经济带水资源绿色效率时空演变特征及其影响因素[J]. 资源科学,2022,44(2):247-260.
- [32] 黄小勇,查育新. 绿色发展效率的测度评价与驱动因素研究——以长江经济带为例[J]. 价格理论与实践,2022(6):7-11+42.

(上接第27页)

- [25] 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.
- [26] CHEN Zhijun, LI Yue, ZHANG Xuechen, et al. Effects of lignite bioorganic product on sunflower growth, water and nitrogen productivity in saline-sodic farmlands at Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107806.
- [27] 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.
- [28] 杨树青,史海滨,苏瑞东,等. 内蒙古河套灌区微咸水利用模式及水土环境预测评估[M]. 北京:科学出版社,2017.

