

基于 SahysMod 的河套灌区不同 灌排方式土壤水盐动态研究

张文聪¹, 周 慧², 李环环¹, 王亚晖¹,
崔志谋¹, 单长河¹, 王凤春¹, 史海滨³

(1.河北水利电力学院水利工程系,河北 沧州 061001; 2.中国水利水电科学研究院内蒙古阴山
北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,内蒙古 呼和浩特 010018;
3.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:土壤盐渍化是制约河套灌区农业可持续发展的重要因素,完善和提高灌排管理对河套灌区土壤盐渍化防治具有关键作用。以河套灌区典型灌排单元为例,基于率定和验证后的 SahysMod 模型,模拟预测在不同灌排管理情景下未来 10 年耕地、荒地土壤饱和浸提液的电导率(EC_e)动态变化。结果表明:在现状引水总量和灌溉定额下,耕地根区土壤 EC_e 值增长较为缓慢,荒地容纳盐分的效果较好,具体表现为 2021—2025 年和 2026—2030 年的耕地根区土壤 EC_e 值分别增加 $0.51 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.49 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增速分别为 13.38% 和 34.40%;荒地根区土壤 EC_e 值分别增加 $8.24 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.44 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增速分别为 29.46% 和 9.49%。通过工程开挖将排水沟深度增加至 1.8 m 时最符合耕、荒地的控盐要求,具体表现为 2021—2025 年和 2026—2030 年耕地根区土壤 EC_e 值增幅分别为 6.92% 和 19.45%;荒地根区土壤 EC_e 值的增幅为 20.26% 和 8.67%。综合考虑后,推荐典型灌排单元维持现状生育时期总引水量、现状灌溉定额,排水斗沟深度从现状 1.5 m 增加到 1.8 m。

关键词:土壤盐分; SahysMod 模型; 灌排管理; 河套灌区

中图分类号: S271 文献标志码: A

Soil water and salt dynamics under various irrigation and drainage methods in the Hetao irrigation district: A SahysMod-based analysis

ZHANG Wencong¹, ZHOU Hui², LI Huanhuan¹, WANG Yahui¹,
CUI Zhimou¹, SHAN Changhe¹, WANG Fengchun¹, SHI Haibin³

(1. Department of Hydraulic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station of Grassland Ecological Hydrology at the North Foot of Yinshan Mountain, Inner Mongolia, China Academy of Water Resources and Hydropower Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: Soil salinization is a significant factor limiting the sustainable development of agriculture in the Hetao irrigation district. Improving irrigation and drainage management plays a crucial role in the prevention and control of soil salinization in the region. Using typical irrigation and drainage units in the Hetao irrigation district as examples, this study simulated and predicted the dynamic changes in soil salinization in both cultivated land and wasteland over the next 10 years under different irrigation and drainage management scenarios, based on the validated SahysMod model. Results indicated that under the current conditions, soil salinity in cultivated land exhibited a slow increase during the early stage of the forecast (2021—2025) and a more pronounced rise in the later stage

(2026—2030)。In contrast, soil salinity in wasteland increased gradually during the early stage of the prediction and remained relatively stable in the later stage. These scenarios were based on the validated SahysMod model. Compared to wasteland, the reduction in total water diversion had a greater impact on soil salinity changes in cultivated land. As the irrigation quota decreased, soil salinity in cultivated land increased significantly. However, as the irrigation quota increased, the rate of reduction in soil salinity accumulation was not as pronounced. Increasing the irrigation quota continues to play an important role in soil salt leaching and in maintaining the effectiveness of drainage and salt removal in the study area. From the perspective of salt accumulation in cultivated land versus wasteland, the most significant salt control effect is achieved by increasing the current drainage ditch depth from 1.5 meters to 1.8 meters.

Keywords: soil salinity; Sahysmod model; irrigation and drainage management; Hetao irrigation district

土壤盐渍化是一种由自然因素或人类活动引起的环境危害,土壤盐渍化威胁着世界上超过五分之一的灌溉地区^[1]。我国盐渍土面积巨大且分布广袤,盐渍化问题突出,对农业生产和生态环境造成不同程度的影响^[2]。内蒙古河套灌区是黄河中上游典型盐渍化特大型灌区,在西北干旱与半干旱地区农业生产中占有重要地位^[3]。近年来,由于指令性节水,河套灌区用水量将从 $5.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 减少到 $4.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$,引水量减少 20% 以上,排水量显著减少 50% 左右^[4]。引排水量的变化使得多年形成的区域水盐平衡被打破,灌区盐渍化风险增加^[5]。众多学者从工程措施、化学措施、农业措施和生物措施等入手,开展了盐碱地治理研究,但土壤盐渍化风险仍较高。农业发展过程中存在的灌溉工程不配套、排水系统不健全、土地不平整等问题是造成区域土壤盐渍化的重要因素^[6]。建立健全完整配套的灌排系统、合理控制地下水位、适宜的灌水方式和灌水量等都是防治土壤盐渍化的有效措施^[7-8]。

以水资源约束背景下的河套灌区为研究对象,通过模型模拟及预测不同灌排管理下区域土壤水盐运动规律,可为土壤盐渍化监测与评价奠定基础^[9-10]。区域尺度土壤水盐运移规律较为复杂且变异性较强^[11],相关研究多集中在耕地土壤盐分动态及盐渍化改良方面,综合考虑区域内耕地及荒地土壤盐分动态变化的灌排管理研究还相对较少^[12]。常用的数值模拟模型(例如 HYDRUS 和 SWAP 等)模拟时间步长较短,通常至少需要逐日时间序列的水文气象数据,同时所需土壤特性数据较多(例如非饱和土壤含水率、水力传导率等),且在短时间内较大空间尺度上又存在着显著变异性,并且不易测量和获取^[13]。此类模型在土体及田间尺度的模拟研究中适用性较强^[14-15],且由于边界条件和源汇项处理的限制,不能考虑不同土地利用类型、植被覆

盖等因素,因此在较大的空间尺度或长期模拟预测研究中具有一定的限制。

SahysMod 是以水盐平衡原理为基础,集成 Salt-Mod 和 SGMP 形成的三维模型^[16],被逐步应用于模拟与预测土壤水(盐)分、地下水和排水的盐分、地下水埋深、排水量等方面^[17-18]。Singh 等^[19]采用 SahysMod 模型分析印度哈里亚纳邦灌区不同水管理情景下的水盐平衡状况,提出适宜的用水管理措施;Yao 等^[20]采用 SahysMod 模型对江苏东台试验站雨养农田的田间土壤和地下水盐度动态进行模拟,并提出合理的地下排水系统是最有效的排盐方法;Inam 等^[21]运用率定验证后的 SahysMod 模型预测巴基斯坦雷希纳多布地区的地下水位变化;黄亚捷等^[22]基于 SahysMod 模型对宁夏银北灌区西大滩未来 10 年内不同灌排管理模式下区域土壤水盐动态变化进行了预测。前人研究均证明,SahysMod 模型可进行长序列的水盐分析预测。在内蒙古河套灌区,Chang 等^[23]基于率定和验证后的 SahysMod 模型,预测不同情景模式下河套灌区地下水盐、排水排盐、地下水埋深等动态变化,对比不同情景方案效果,研究提出适宜的灌区灌排发展模式。河套灌区耕荒地交错,荒地发挥的干排盐作用对于缓解灌区土壤盐渍化具有重要意义,荒地盐分的长期动态变化需要进一步讨论,不同灌排管理方案对耕、荒地土壤盐分的综合影响的研究相对较少,还需要进行深入探讨。

本研究在限制引水背景下,以河套灌区解放闸灌域典型灌排单元为例,基于研究区的土地利用类型、作物种植结构、土壤水盐、地下水盐等数据,考虑耕地及荒地土壤水盐的空间变异性,通过率定和验证后的 SahysMod 模型,预测研究区未来 10 年不同灌排管理情景下区域耕、荒地土壤水盐动态变化,以期通过优化灌排管理模式缓解灌区土壤盐渍化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区解放闸灌域的中东部(40°55'15"~40°56'53" N, 107°9'18"~107°10'23" E), 总面积约 331.89 hm², 其中耕地面积为 289.34 hm², 荒地面积为 18.02 hm², 村庄面积为 24.53 hm²。研究区地形较为平缓, 整体地势东南高、西北低, 海拔高程 1 039~1 040 m, 属于温带大陆性气候, 干旱少雨, 蒸发强烈, 年均降水量 138.2 mm, 主要集中在 7—9 月, 年均蒸发量达 2 096.4 mm^[5], 是典型的引黄灌溉农业区。长年的引黄灌溉在引入大量盐分的同时, 也形成了地下水埋深较浅的现状。研究区地形平缓, 侧向径流不畅, 排泄方式以强烈的垂向蒸发为主。含盐浅层地下水位变化是造成盐分向土壤表层聚集的主要因素, 研究区灌溉引水系统较为完善, 但排水设施相对落后, 沟道淤积、排水不畅也加重了土壤盐渍化。研究区内进行过多次各类盐渍化改良措施, 耕地和荒地区域内呈插花状分布。荒地是区域内部地势低洼、长期未开垦且受土壤盐渍化严重影响的土地。既是自然形成的地貌, 同时又具有接收邻近灌溉耕地多余水分和盐分的功能。

在研究区以 200 m×200 m 网格均匀布置了 58 个土壤水盐监测点(如图 1 所示), 以进行土壤基础数据采集。土壤水盐监测点覆盖其中主要作物田块和天然荒地。每 15 天监测一次土壤水分和盐分, 采样层分别为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm, 同时测定土壤容重、田间持水量和地下水电导率等。

1.2 研究方法

1.2.1 SahysMod 模型介绍

SahysMod 模型是一种分布式水盐均衡模型, 通过内部及外部多边形将研究区分为不同的单元网格, 每个网格作为一个独立的研究单元, 可以设置不同的参数, 能够考虑研究区的土壤、作物、灌溉、地形等空间变异性, 用来预测和分析区域长序列土壤盐分、地下水埋深、排水量及不同用水管理方案下动态变化^[16]。根据研究区气候条件、作物生长、灌溉期等, 在 SahysMod 模型中分为 3 个模拟季节, 即生育时期(5—9 月)、秋浇期(10—11 月)和冻融期(12 月—翌年 4 月)。在垂直方向将土壤剖面分为四层, 即地表、根区、过渡层、含水层。

$$P_p + I_g + \lambda_0 = E_0 + \lambda_i + S_0 + \Delta W_s \quad (1)$$

式中, P_p 为降水量(m); I_g 为控制面积上的灌水量

(m); λ_0 为从根区进入地表的水量(仅在地下水位在地表以上时才发生, m); E_0 为地表水面蒸发量(m); λ_i 为从地表入渗到根区的水量(m); S_0 为地表径流量(m); ΔW_s 为储存在地表的水量变化量(m)。

$$\lambda_i + R_r = \lambda_0 + E_{ra} + L_r + \Delta W_f + \Delta W_r \quad (2)$$

式中, R_r 为进入根区的毛细管上升水量(m); E_{ra} 为根区腾发量(m); L_r 为根区渗漏水量(m); ΔW_f 为根区的田间持水量和凋萎点之间的土壤有效持水量(m); 当根区水量处于田间持水量与完全饱和之间时, ΔW_r 为根区的田间持水量和饱和含水量之间的土壤持水量(m)。 R_r 和 L_r 不能同时发生, 即 $R_r > 0$ 时, $L_r = 0$, 反之亦然, 当计算时段较长时, ΔW_f 通常可以忽略不计。

$$L_r + L_c + V_r + G_{ii} = R_r + V_L + G_d + G_{io} + \Delta W_x \quad (3)$$

式中, L_c 为渠道渗漏水量(m); V_r 为从含水层垂直进入过渡层的毛管上升水量(m); V_L 为从过渡层渗漏到含水层的水量(m); G_d 为总排水量(m); G_{ii} 为水平流入含水层中的水量(m); G_{io} 为水平流出含水层中的水量(m); ΔW_x 为过渡层的田间持水量和凋萎点之间的有效持水量(m)。 V_r 和 V_L 不能同时发生, 即 $V_r > 0$, $V_L = 0$, 反之亦然。

$$G_i + V_L + Q_i = G_0 + V_r + G_w + Q_o + \Delta W_q \quad (4)$$

式中, G_i 为水平进入含水层的地下水水量(m); Q_i 为含水层流入条件; G_0 为水平流出含水层的地下水水量(m); Q_o 为含水层流出条件; G_w 为地下水抽水量(m)。

盐分平衡方程是基于水平衡方程及其中各项所对应的盐分建立的, 地下水流动是基于有限差分法确定。详细的 SahysMod 模型对区域土壤水盐平衡方程及地下水流动的计算见参考文献^[17,24]。

1.2.2 研究区网格划分

通过节点网络将研究区划分为 121 个多边形网格(内部网格 81 个, 外部网格 40 个), 设定比例为 1 : 191, 每个网格均是 1 个面积约为 5 hm² 的均质单元, 考虑不同网格间的土壤水盐运动。内部多边形网格为研究区域, 每个内部多边形网格参数一致, 若同一个网格内存在多种作物, 则基于不同作物的面积所占比例确定参数。外部多边形所处的位置是研究区边界, 研究区东面和北面是 713 县道, 西南是沙壕分干渠, 边界较为清晰且地下水侧向径流稳定, 四周的干渠和公路在一定程度上起到了阻断其地下水侧向运移的作用, 因此认为此条件下的研究区外边界条件为定水头边界条件。

1.2.3 SahysMod 模型参数设置

SahysMod 主要输入参数包括气象、土壤、作物、地下水、灌溉以及排

水等,主要输出数据包括土壤盐分、排水和地下水的矿化度、地下水埋深、排水量等。其中气象数据、土壤盐分、作物类型、引排水、地下水埋深及矿化度等基础参数通过实际监测及有关文献的取值范围获取,部分中间过程参数值采用模型默认值。采用 SahysMod 模型计算的电导率为田间土壤饱和电导率(即 EC 值)。根据土壤饱和浸提液的电导率 EC_e 与田间土壤饱和条件下电导率 EC 的换算关系^[25],即 $EC=2EC_e$,将模型中输出的 EC 值均已换算成 EC_e 值,下文所提及的土壤电导率均指 EC_e 。矿化度与模型所需电导率 EC 值的转换关系为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}=1.7\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。设置参数时需要考虑空间变异性的有根区及过渡层的初始土壤盐分、根区总孔隙度、根区有效孔隙度、根区田间持水量、根区淋洗效率。

具体数据来源及参数值详见表 1~3。

1.2.4 SahysMod 模型参数敏感性分析 为了分析 SahysMod 模型中各输入参数的敏感度,以检验模型的准确性和指导模型率定和验证,对各参数进行敏感性分析,分析的参数主要包括根区淋洗效率 Fl_r 、过渡层淋洗效率 Fl_x 、含水层淋洗效率 Fl_q 、含水层导水率 Ka_q 。 Fl_r 定义为根层渗漏水盐分浓度与饱和土壤水平均盐分浓度的比值,取值范围为 $0\sim 1$; Fl_x 为过渡层渗漏水盐分浓度与饱和土壤水平均盐分浓度的比值,可取 $0\sim 1$ 范围内的任意值; Fl_q 是从含水层渗漏出的溶液盐分浓度与含水层饱和时的平均盐分浓度的比值,取值范围在 $0.01\sim 2$, Fl_q 值越大说明淋洗效果越好。由于本研究的研究尺度相对较小,根层、过渡层和含水层性质相差不大,在进行率

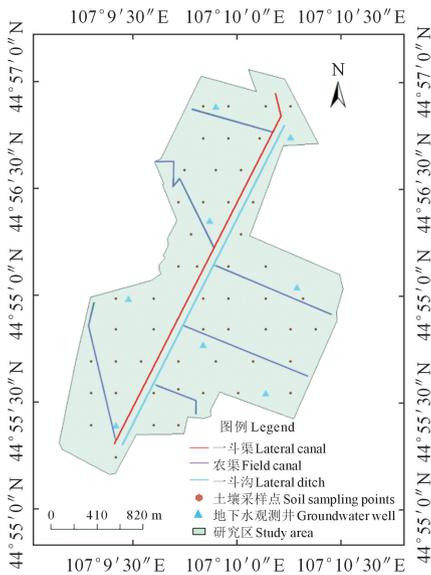


图 1 研究区及采样点分布图

Fig.1 Distribution of study area and sampling points

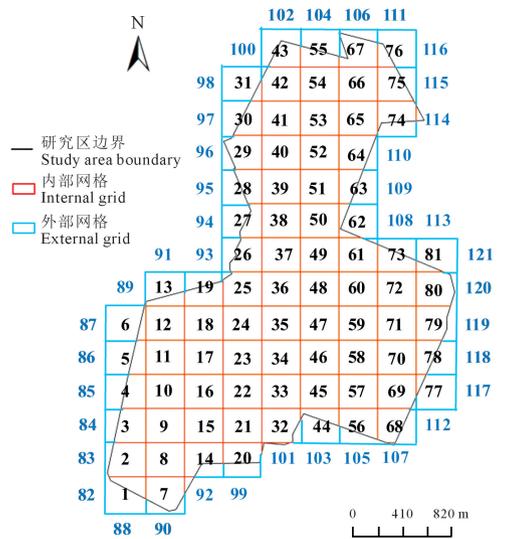


图 2 SahysMod 模型中多边形网格设置

Fig.2 Polygonal mesh settings in SahysMod model

表 1 SahysMod 模型参数值

Table 1 Source of main data of study area

主要数据 Main data	采样时间 Sampling time (y-m)	数据来源 Data source
气象数据 Meteorological data	2016-04—2021-04	沙壕渠自动气象站及当地气象局 Shahaoqu automatic meteorological station and local meteorological bureau
地下水数据 Groundwater data	2018-07—2021-04	地下水观测井长期观测 Long term observation of groundwater observation wells
土壤电导率 Soil conductivity	2018-05—2021-04	田间分层采样 Field stratified sampling
土壤理化性质 Soil physical and chemical property	2019-07	田间实地采样分析 Field sampling analysis
含水层性质 Aquifer property	2019-04—2021-04	历史资料及实地采样分析 Historical data and on-site sampling analysis
引排水数据 Water diversion and drainage data	2019-04—2021-04	流速仪观测及用水管理段调查 Observation of flow meter and investigation of water management section

定时,不考虑 Flr 和 Flx、Flq、Kaq 的变异性。参照相关研究^[26],采用参数 $\pm 15\%$ 和 $\pm 20\%$ 来评定其敏感性。在进行敏感性分析时认为模型中其他参数基

本不变。采用均方根误差 (*RMSE*)、平均相对误差 (*MRE*)、归一化均方根误差 (*NRMSE*) 和决定系数 (R^2) 进行参数率定评价。

表2 SahysMod 模型季节性输入数据

Table 2 Seasonal input data of SahysMod model

多边形网格输入参数 Polygonal mesh input parameter	参数值 Parameter value	数据来源 Data source
季节 1(作物生育时期) Season 1 (Crop growth period)	5—9月 May to September	M
季节 2(秋浇期) Season 2 (Autumn irrigation season)	10—12月 October to December	M
季节 3(封冻期) Season 3 (Frozen period)	翌年 1—4月 January to April of the next year	M
降水量 Precipitation/m	0.125/0.01/0.01	M
灌溉量 Irrigation amount/m	0.421/0.241/0	M
潜水蒸发量 Submersible evaporation rate/m	0.741/0.11/0.07	M
灌溉降水携带盐分 Irrigation precipitation carries salt/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.85	M
地表径流量 Surface runoff/m	0	M
根区对灌溉降水的储存效率 Storage efficiency of irrigation precipitation in the root zone	0.8	M/R
含水层抽水量 Aquifer pumping capacity	0	M

注: M 表示实测资料或调研资料; R 表示查阅参考文献获得; S 表示通过模型率定获得。下同。

Note: M represents actual measurement data or research data; R represents obtaining by consulting references; S represents obtained through model calibration. The same below.

表3 SahysMod 模型多边形输入数据

Table 3 Polygonal input data of SahysMod model

多边形网格输入参数 Polygonal mesh input parameter	参数值 Parameter value	数据来源 Data source
地表厚度 Surface thickness/m	0	M
根区厚度 Root zone thickness/m	1	M
过渡层厚度 Transition layer thickness/m	4	M
含水层厚度 Aquifer thickness/m	90	M
灌溉面积比例 Irrigation area ratio	0.87	M
预测周期 Prediction period/a	10	M
轮作指数 Crop rotation index	1	M
过渡层水平导水率 Transition layer horizontal hydraulic conductivity/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.13	R
含水层水平导水率 Horizontal hydraulic conductivity of aquifer/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	6.08	S
根区总孔隙度 Root zone total porosity	0.48	R
过渡层总孔隙度 Total porosity of transition layer	0.48	R
含水层总孔隙度 Total porosity of aquifer	0.4	R
根区有效孔隙度 Effective porosity of root zone	0.07	R
过渡层有效孔隙度 Effective porosity of transition layer	0.07	R
含水层有效孔隙度 Effective porosity of aquifer	0.1	R
根区淋洗效率 Root zone rinsing efficiency	0.85	S
过渡层淋洗效率 Transition layer rinsing efficiency	0.8	S
含水层淋洗效率 Efficiency of aquifer leaching	1.0	S
根区初始土壤电导率 Initial soil conductivity in the root zone/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.34~6.79	M
过渡层初始土壤电导率 Initial soil conductivity of transition layer/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.22~5.58	M
含水层初始土壤电导率 Initial soil conductivity of aquifer/($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.13~2.15	M
初始地下水相对参考水位 Initial groundwater relative reference level/m	1047.9~1049.3	M
每季含水层流入水量 Quarterly inflow of water into the aquifer/m	0	M
每季含水层流出水量 Quarterly outflow of aquifer/m	0	M
自然排水量 Natural displacement/m	0	M
产生毛管水上升水的地下水埋深临界深度 Groundwater that generates capillary water upwelling critical burial depth/m	2.5	M
排水沟深 Depth of drainage ditch/m	1.5	M
排水间距 Drainage spacing/m	100	M

1.2.5 模型验证指标 采用均方根误差 $RMSE$ 、相对误差 MRE 、归一化均方根误差 $NRMSE$ 和决定系数 R^2 这 4 个指标评判模型拟合结果, 计算公式分别如下^[25,27-28]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}{\bar{O}} \times 100\% \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

式中, N 为实测值的个数, O_i 为第 i 个实测值, P_i 为相应第 i 个实测值的模拟值 ($i = 1 \sim N$), \bar{O} 为实测值的平均值, \bar{P} 为模拟值的平均值。其中 $RMSE$ 、 MRE 和 $NRMSE$ 越接近于 0, 表示模型模拟精度越高。一般认为 $RMSE$ 与平均实测值的比值在 20% 以内, MRE 在 $\pm 10\%$ 以内, 即达到率定要求。当 $NRMSE < 10\%$ 时, 认为模型拟合效果非常好; 当 $10\% < NRMSE < 20\%$ 时, 认为模型拟合效果较好, 当 $20\% < NRMSE < 30\%$ 时, 认为模型拟合一般, 当 $NRMSE > 30\%$ 时, 拟合效果较差。当 $R^2 > 0.5$ 时, 认为拟合结果在可接受范围之内。

1.2.6 灌排管理模式情景设置 综合考虑研究区作物生育时期水资源限制、灌排发展、土壤盐渍化等。本文主要对季节 1 展开研究, 分别对季节 1 引水总量(现状、减少 5%、减少 10%、减少 15%、减少 20%)、灌溉定额(减少 20%、减少 10%、现状、增加 10%、增加 20%)、排水沟深度(减少 20%、减少 10%、现状、增加 15%、增加 20%), 在保持 1 个变量的基础上, 共设置 4 种方案预测不同灌排模式对耕、荒地土壤水盐长期动态变化的影响(见表 4)。

2 结果与分析

2.1 SahysMod 模型率定及验证

2018—2019 年为率定期, 2020 年为验证期。由于研究区划分出的网格数量较多, 无法逐一进行验证, 因此随机选取研究区内的耕地网格 9、18、54、57 和荒地网格 3、41、46, 选取不同 Flr 值, 模拟计算根区土壤电导率, 将实测值与模拟值进行比较, 其中吻合度最好的 Flr 值即为实际的 Flr 值。参照过往研究^[27], 在本研究中将 Flr 范围设定为 0.8~0.9, 率定结果详见表 5, 当 Flr 为 0.85 时, 模拟结果与实测值拟合最好, $RMSE$ 、 MRE 和 $NRMSE$ 分别为 0.066 $dS \cdot m^{-1}$ 、-0.22% 和 0.012, R^2 为 0.920。因此将研究区整体的 Flr 取值为 0.85。

基于不同 Flx 值, 模拟计算地下水埋深, 实测值与模拟值详见表 6。结果表明, 当 Flx 为 0.8 时, $RMSE$ 、 MRE 和 $NRMSE$ 均为最小, 分别为 0.02 m、-1.19% 和 0.014, R^2 达到 0.811, 地下水埋深的模拟值与实测值吻合最好。综合考虑 $RMSE$ 、 MRE 、 $NRMSE$ 和 R^2 , Flq 取值为 1.0。当 Kaq 取 $8 m \cdot d^{-1}$ 时, $RMSE$ 、 MRE 和 $NRMSE$ 均为最小, 分别为 0.115 m、7.68% 和 0.079, R^2 为 0.820, 地下水埋深的模拟值与实测值吻合程度最好。

以 2018 年 7 月、2018 年 9 月、2019 年 5 月和 2019 年 7 月的土壤根区 EC_e 值进行 SahysMod 模型参数率定, 以 2020 年 8 月的根区土壤 EC_e 值进行验证, 详见表 7。结果表明, 耕地与荒地模型中模拟值与实测值吻合度较好, 耕地 $RMSE$ 为 0.087~0.131 $dS \cdot m^{-1}$, MRE 为 0.87%~1.28%, $NRMSE$ 为 0.013~0.019, R^2 为 0.768~0.875; 荒地 $RMSE$ 为 0.124~0.172 $dS \cdot m^{-1}$, MRE 为 0.99%~1.88%, $NRMSE$ 为 0.009~0.012, R^2 为 0.779~0.900。以上均可说明模型能够较好地反映研究区耕、荒地土壤盐分的变化规律。

表 4 不同灌排管理模式情景设置

Table 4 Settings of different irrigation and drainage management scenarios

情景 Scene	季节 1 引水总量 Season 1 total water intake ($10^4 m^3$)	季节 1 灌溉定额 Season 1 irrigation quota/mm	排水沟深 Depth of drainage ditch/m
现有灌排模式 Current irrigation and drainage mode	144.9	419	1.5
不同引水总量 Different total water intake amounts	144.9, 137.7, 130.4, 123.2, 115.9	419	1.5
不同灌水定额 Different irrigation quotas	144.9	335, 377, 419, 461, 503	1.5
不同排水沟深度 Different depths of drainage ditch	144.9	419	1.2, 1.35, 1.5, 1.65, 1.8

表 5 根区淋洗效率率定

Table 5 Calibration of leaching efficiency of root zone

网格编号 Grid number	土地利用类型 Land use type	根区淋洗效率 Flr	电导率 Conductivity /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	日期 Date(y-m)					RMSE /($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	MRE /%	NRMSE	R^2
				2018-07	2018-09	2019-05	2019-07	2020-08				
9	耕地 Cultivated land	0.8	M	5.46	7.21	6.75	5.07	4.98	0.171	-0.702	0.028	0.809
			P	5.27	7.03	6.92	4.91	5.14				
18	耕地 Cultivated land	0.82	M	5.42	8.12	6.64	6.67	7.98	0.135	-0.436	0.020	0.813
			P	5.31	8.26	6.77	6.55	7.82				
54	耕地 Cultivated land	0.84	M	5.28	7.48	6.29	7.82	8.08	0.103	-0.256	0.015	0.861
			P	5.22	7.60	6.22	7.68	8.19				
57	耕地 Cultivated land	0.85	M	4.77	5.33	4.99	4.80	4.99	0.066	-0.220	0.012	0.920
			P	4.81	5.31	5.07	4.72	4.91				
3	荒地 Wasteland	0.86	M	11.59	11.11	10.51	10.54	10.07	0.119	1.096	0.013	0.911
			P	11.74	11.21	10.61	10.67	10.18				
41	荒地 Wasteland	0.88	M	17.27	19.64	19.01	16.93	18.36	0.207	1.130	0.015	0.880
			P	17.46	19.79	19.22	17.19	18.57				
46	荒地 Wasteland	0.9	M	14.54	11.90	14.01	12.60	15.59	0.208	1.492	0.015	0.824
			P	14.78	12.12	14.24	12.73	15.79				

注: M 表示实测值, P 表示模拟值。

Note: M represents the measured value, and P represents the simulated value.

表 6 过渡层淋洗效率、含水层淋洗效率及含水层水平导水率的率定

Table 6 Calibration of leaching efficiency of transition zone, aquifer zone and horizontal hydraulic conductivity

参数 Parameter	值 Value	不同时期地下水埋深预测值 Predicted groundwater depth at different periods					RMSE /m	RME /%	NRMSE	R^2
		2018-07	2018-09	2019-05	2019-07	2020-08				
		过渡层淋洗效率 Flx	0.4	1.796	2.214	1.106				
	0.6	1.769	2.187	1.063	1.288	2.567	0.108	6.68	0.070	0.784
	0.7	1.742	2.181	0.984	1.128	2.510	0.038	1.36	0.022	0.802
	0.8	1.725	2.140	0.955	1.102	2.399	0.020	-1.19	0.014	0.811
	0.9	1.701	2.018	0.931	0.960	2.315	0.112	-6.32	0.080	0.800
含水层淋洗效率 Flq	0.6	1.752	2.184	1.010	1.308	2.453	0.088	4.78	0.043	0.660
	0.8	1.739	2.176	0.992	1.127	2.436	0.012	0.81	0.012	0.740
	1.0	1.745	2.172	0.984	1.133	2.441	0.012	0.83	0.008	0.768
	1.2	1.719	2.138	0.950	1.104	2.409	0.020	-1.27	0.014	0.732
	1.4	1.696	2.111	0.957	1.105	2.397	0.033	-3.44	0.022	0.703
含水层导水率 Kaq/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	3.0	1.552	1.983	0.886	0.947	2.614	0.185	-10.76	0.138	0.777
	5.0	1.683	2.028	0.926	0.977	2.202	0.144	-7.86	0.130	0.802
	8.0	1.814	2.291	1.105	1.220	2.507	0.115	7.68	0.079	0.820
	10.0	1.886	2.417	1.190	1.402	2.600	0.221	15.08	0.128	0.744
	12.0	1.954	2.514	1.269	1.308	2.691	0.270	17.46	0.153	0.668
地下水埋深实测值/m Measured groundwater depth		1.731	2.165	0.972	1.119	2.428				

模型中用于率定和验证的关键参数 Flr、Flx、Flq、Kaq 的默认值和校准值分别为 0.7 和 0.85、0.7 和 0.8、1.0 和 1.0、 $1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $8 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 其中 Flr 和 Flx 的率定值提升了模型的预测准确性, Flq 保持不变被认为是最优选择, Kaq 的率定值显著提高了地下水流动预测的精度。

2.2 SahysMod 模型参数敏感性分析

在分析根区淋洗效率对土壤 E_{Ce} 的影响时, 采用较长时间步骤, 以便更清晰观察长期水盐运移对

土壤盐分的影响; 而在分析过渡层淋洗效率和含水层导水率对地下水埋深的影响时, 采用更短时间步骤, 以捕捉地下水对短期环境因素的敏感变化。不同时间步长的设置有助于更全面呈现不同物理过程对土壤和地下水的影响, 进而提高模型精度。不同参数对模拟结果的影响程度不同, 采用对已选定的参数值及相邻参数评定其参数敏感性, 进而确定对模型输出结果产生较大影响的参数。选取网格编号为 3、9、41、54, 分析 Flr 对土壤电导率的敏感性

(图 3)。结果表明,当 Flr 增加 15% 时,根区土壤 EC_e 值减小幅度较大;当 Flr 减小 15% 时,根区土壤 EC_e 值增加趋势明显,Flr 对根区土壤 EC_e 值较为敏感。分析 Flx、Flq 和 Kaq 对地下水埋深的敏感性(图 4)。结果表明,当 Flx 减小 20% 时,地下水埋深略有增加;当 Flx 增加 20% 时,地下水埋深略有减少。Flx 对地下水埋深的敏感性较低;当 Flq 增加 20% 时,地下水埋深略有减小;当 Flq 减小 20% 时,地下水埋深略有增加。

2.3 不同情景下土壤水盐长期动态变化规律

2.3.1 现有灌排管理模式 基于率定和验证后的 SahysMod 模型,以 2021 年为初始时间,随机选取编

号 12、36、69 的耕地网格与编号 38、41、46 的荒地网格为例,预测研究区现状灌排管理模式下耕地、荒地根区土壤 EC_e 值在未来 10 年的动态变化(图 5)。为更清晰地展示土壤盐分和地下水埋深的动态变化趋势,本研究将 10 年的预测时段划分为两个 5 年期。这一划分不仅有助于增强趋势分析的清晰性,同时也与农业和水资源管理的中期规划周期相一致,更贴近实际管理的时间框架,从而使研究结果更具参考价值 and 可操作性。结果显示,现状灌排条件下,在预测初期,即 2021—2025 年,耕地根区土壤 EC_e 值增长幅度为 13.38%,增长速率相对缓慢,到 2026—2030 年增长幅度达到 34.40%,增加趋势较为明显。

表 7 基于 SahysMod 模型的土壤 EC_e 值与实测值比较

Table 7 Comparison of measured and predicted soil EC_e based on SahysMod

年份类型 Year type	日期 Data (y-m)	地类 Land use	实测值 Measured value	模拟值 Simulated value	$RMSE$ $/((dS \cdot m^{-1})$	MRE /%	$NRMSE$	R^2
数据率定年 Data calibration year	2018-07	耕地 Cultivated land	5.65	5.68	0.106	1.28	0.019	0.826
		荒地 Wasteland	14.17	14.19	0.147	0.99	0.010	0.779
	2018-09	耕地 Cultivated land	7.46	7.41	0.114	0.87	0.015	0.768
		荒地 Wasteland	13.96	13.94	0.129	1.88	0.009	0.840
	2019-05	耕地 Cultivated land	6.59	6.64	0.109	1.11	0.017	0.827
		荒地 Wasteland	14.21	14.14	0.124	1.52	0.009	0.815
数据验证年 Data validation year	2019-07	耕地 Cultivated land	6.51	6.55	0.087	0.94	0.013	0.822
		荒地 Wasteland	13.36	13.42	0.155	1.64	0.012	0.889
	2020-09	耕地 Cultivated land	6.93	6.90	0.131	1.05	0.019	0.875
		荒地 Wasteland	14.47	14.43	0.172	1.71	0.012	0.900

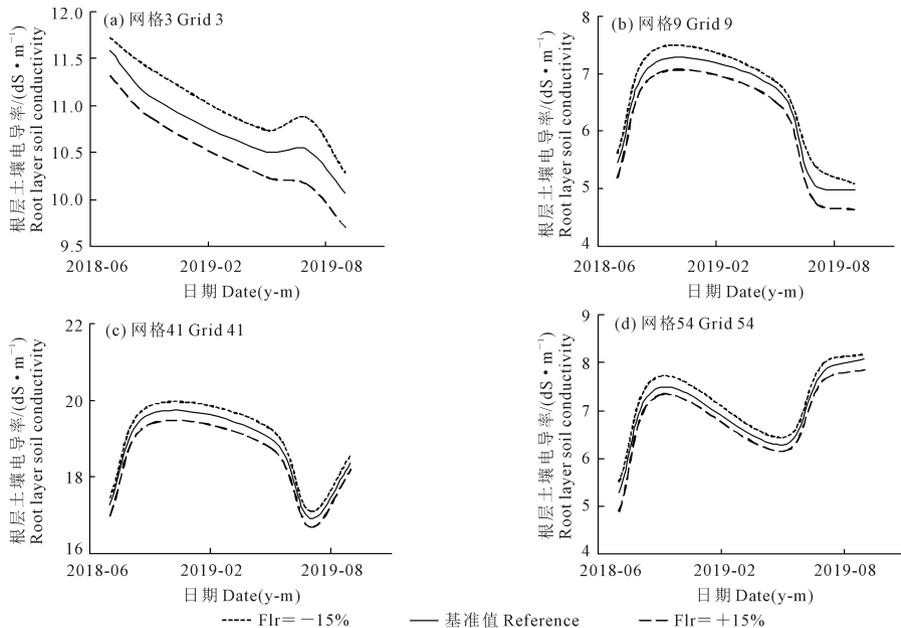


图 3 根区淋洗效率对土壤电导率敏感性分析

Fig.3 Sensitivity analysis of root zone leaching efficiency on soil electrical conductivity

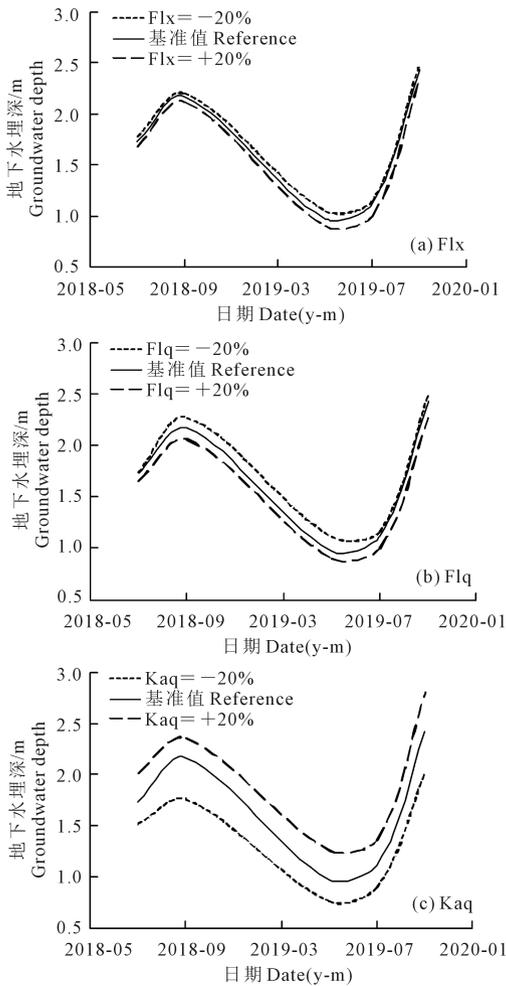


图4 过渡层淋洗效率、含水层淋洗效率和含水层水平导水率对地下水埋深的敏感性分析
Fig.4 Sensitivity analysis of leaching efficiency of transition zone, aquifer and horizontal hydraulic conductivity of aquifer on groundwater depth

图6中S1、S2和S3分别代表生育时期(5—9月)、秋浇期(10—11月)和冻融期(12—翌年4月),10年中(S1、S2、S3)的地下水平均埋深分别增加了0.49、0.42、0.60 m,增长幅度分别约为32.67%、25.68%、30.30%。常年的引黄灌溉加之排水不畅,研究区地下水埋深逐渐变浅。冻融期几乎无外来水分补充,因此认为在S3无排水,10年内S1和S2排水斗沟的排水矿化度分别增加了 $1.06 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.96 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增长幅度分别约为29.94%和2.29%。

2.3.2 不同引水总量 针对河套灌区限制引水政策,将研究区总引水量分别设置减小5%、10%、15%和20%,研究不同引水量下未来10年研究区季节1耕,荒地根区土壤 EC_e 值动态变化情况。从图7可以看出,随着引水总量的减少,同一时期耕地根区土壤盐分增加。虽然随着引水量减少,进入耕地的

盐量随之减少,但是用于淋洗盐分的水量也相应减少。减少的灌溉水量携带进入的盐分总量要小于淋洗排出研究区的盐分总量。

比较5种引水量情景,现状引水条件下,2021—2025年和2026—2030年的耕地根区土壤 EC_e 值分别增加 $0.51 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.49 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增长速率分别为13.38%和34.40%;荒地根区土壤 EC_e 值分别增加约 $8.24 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.44 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增长速率分别为29.46%和9.49%。耕地根区土壤 EC_e 值增长的速率最为缓慢,由于引水量最大,荒地根区土壤盐分的增长速率最大,综合考虑下,仍推荐维持现状引水量。

2.3.3 不同灌溉定额 从模拟不同引水总量对耕地荒地根区土壤 EC_e 值影响的结果来看,研究区需要保持必要的淋洗水量,应该深入探讨灌溉定额增加或减少对研究区根区土壤 EC_e 值的影响。假设其他条件不变,在研究区随机选取编号为12、36、69的耕地,设置不同的灌溉定额分别增加20%和10%以及减少20%和10%的几种方案,由于只对耕地进行灌溉,因此只模拟和讨论不同灌溉定额对耕地根区土壤 EC_e 值的影响。

如图8所示,在现状灌溉定额(419 mm)下,2021—2025年耕地根区土壤 EC_e 值增加了 $0.51 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增幅为13.38%,增速相对缓慢,2026—2030年,根区土壤 EC_e 值增加约 $1.49 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,增幅约34.40%。研究区内作物以向日葵和玉米为主,参照童文杰等^[29]的研究成果,当向日葵和玉米根区土壤 EC_e 值分别达到 $5.72 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $3.93 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,作物生长进入了障碍水平,开始减产10%以上。在预测初期,网格12、36和69的耕地根区土壤 EC_e 值已达到或接近玉米产量的障碍水平;到了预测后期,耕地根区土壤 EC_e 值积累到向日葵产量的障碍水平。

当灌溉定额从419 mm分别减小到377 mm和335 mm时,2021—2025年耕地根区土壤 EC_e 值增加幅度会明显提升,分别为24.23%和37.08%,耕地根区土壤 EC_e 值会提前积累到障碍水平。为淋洗盐分还需维持一定的灌溉定额,因此不推荐灌溉定额为377 mm和335 m。现状灌溉定额分别增加到461 mm和503 mm后,2021—2025年的根区土壤 EC_e 值分别增长 $0.36 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.18 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,相比现状灌溉定额,分别同比减少了 $0.15 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,延迟了耕地根区土壤盐分累积到障碍水平的的时间。综合淋洗效果以及节水背景,推荐419 mm作为灌溉定额。

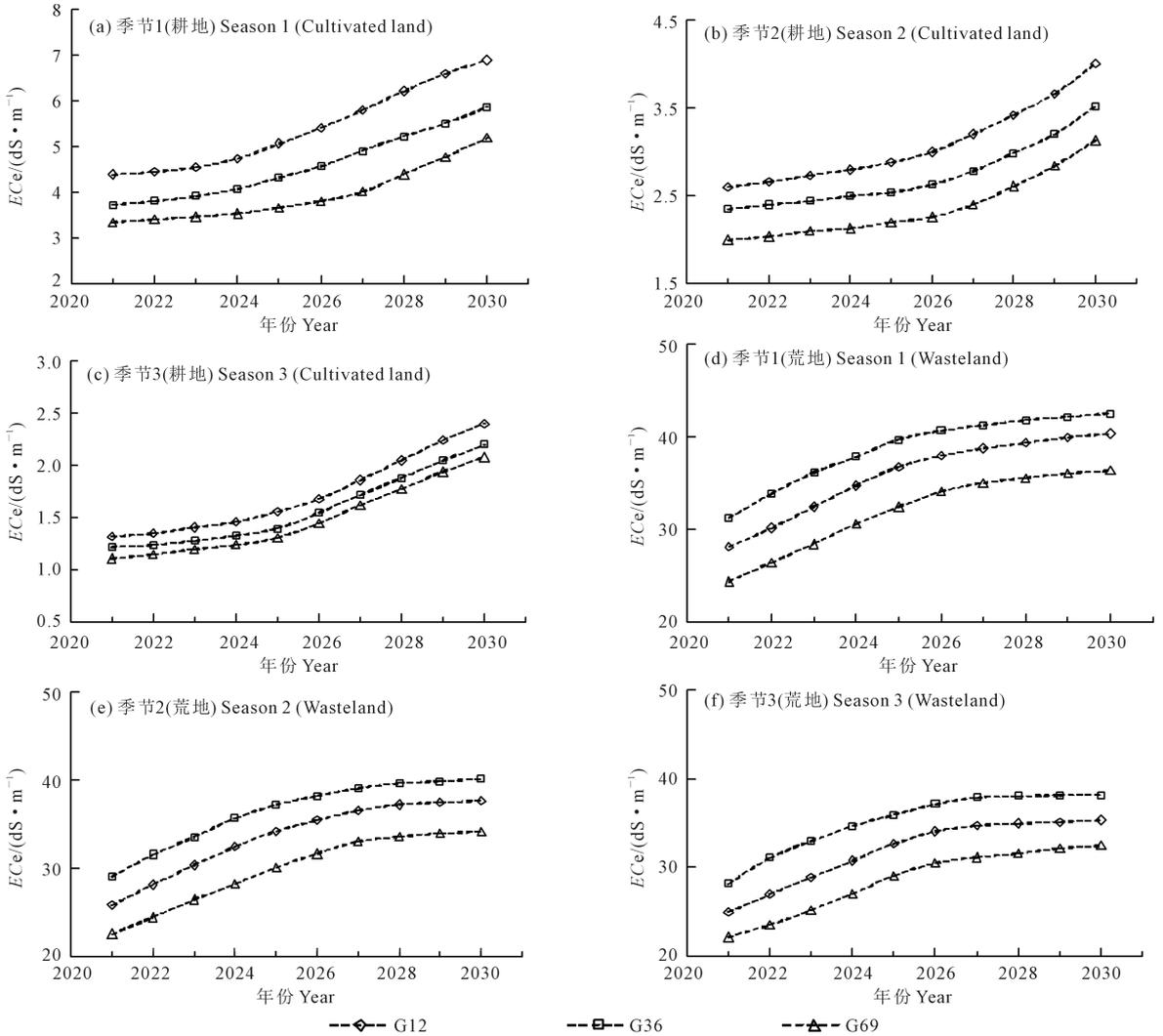


图 5 现有灌排管理下的耕荒地未来 10 年土壤电导率变化

Fig.5 Changes in soil conductivity of cultivated wasteland under existing irrigation and drainage management in the next 10 years

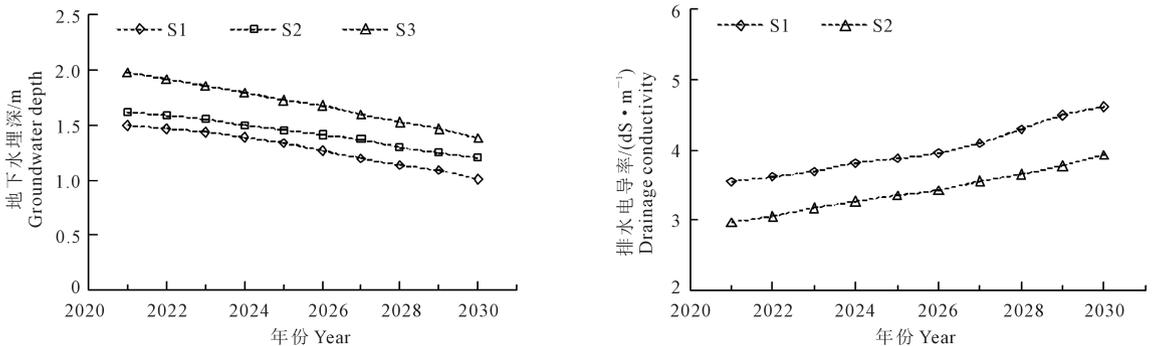


图 6 未来 10 年地下水埋深和排水电导率变化

Fig.6 Changes in drainage conductivity and groundwater depth in the next 10 years

2.3.4 不同排水斗沟深度 图 9 为不同排水沟深度条件下,未来 10 年季节 1 耕地和荒地根区土壤 EC_e 值的动态变化。在排水沟深度增加至 1.8 m 时,2021—2025 年和 2026—2030 年耕地根区土壤

EC_e 值分别增加了 $0.26 dS \cdot m^{-1}$ 和 $0.79 dS \cdot m^{-1}$,增幅分别为 6.92% 和 19.45%。当排水沟深度减小到 1.2 m 时,2021—2025 年和 2026—2030 年耕地根区土壤 EC_e 值分别增加 $1.25 dS \cdot m^{-1}$ 和 $2.31 dS \cdot$

m^{-1} , 增长速率达到 32.89% 和 45.59%。到预测后期, 排水沟深度减小条件下的耕地根区土壤 EC_e 值增加速度变快, 而排水沟加深时, 根区土壤 EC_e 值增加幅度放缓。分析原因认为, 同一时期排水沟深度越深, 排水排盐效果越好, 较大排水量稀释了排水矿化度; 当排水沟深度增加到 1.8 m 时, 研究区的排水排盐效果应最佳, 未来 10 年内耕地土壤处在相对良好的耕作环境。

荒地根区土壤盐分累积受排水沟深度影响, 当排水沟深度加深至 1.8 m 时, 2021—2025 年和 2026—2030 年荒地根区土壤 EC_e 值的增长幅度为 20.26% 和 8.67%。分析原因认为排水沟加深使得排水排盐效果变好, 荒地根区积盐的速度变缓; 而排水沟深度为 1.2 m 时, 荒地根区土壤 EC_e 值的增幅分别为 38.47% 和 11.25%, 虽然前期干排盐效果增强, 但会提前到达荒地容纳盐分总量的时间, 不

利于研究区的可持续发展。

距离排水沟较近的荒地, 对排水沟深度变化响应较为敏感, 例如编号 38、46 的荒地, 排水沟深度的改变会对根区盐分累积量和累积速率产生较大影响, 而编号为 41 的荒地, 距离排水沟相对较远, 受排水沟深度影响不大。在设计和完善排水系统时, 应结合研究区实际情况, 综合考虑造价成本、维修维护等。综上所述, 推荐 1.8 m 作为研究区的排水沟深度。

3 讨论

3.1 SahysMod 模型参数及网格选取

相关研究表明, Fl_r 值存在空间变异性, 研究区耕地根区土壤大多为粉砂壤土, 灌溉条件也较为统一, 但耕荒地间的土壤质地、灌溉条件等存在一定差异, 但考虑到荒地占比仅为研究区总面积的 6.01%, 将研究区整体的 Fl_r 取值为 0.85 是合理的。

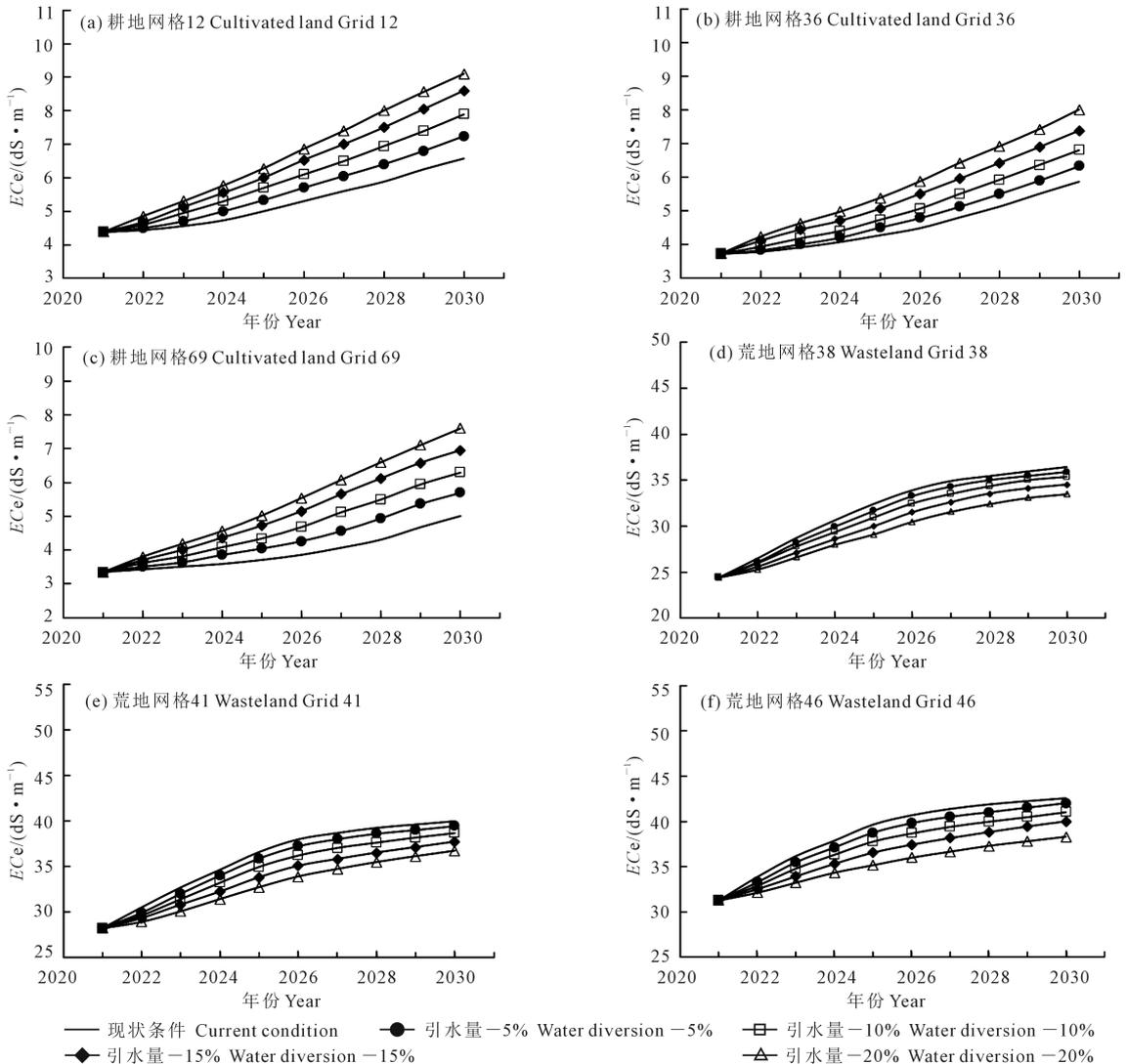


图 7 引水总量对季节 1 耕地、荒地根区土壤 EC_e 值的影响

Fig.7 Effect of irrigation water conductivity on soil EC_e of cultivated land and wasteland in Season 1

以往研究表明, Fl_q 对地下水埋深的影响随研究尺度变化, 当研究尺度为田间尺度时, Fl_q 对地下水埋深几乎无影响^[30], 研究尺度变大时, 区域内不同地类间的地下水埋深差异可能会使得 Fl_q 对其产生微弱影响^[31]。本研究将 Fl_q 取值为 1.0, 与 Chang 等^[23] 和陈艳梅等^[27] 在河套灌区解放闸灌域的研究结果一致。

Eishoei 等^[1] 和 Yao 等^[26] 指出, Ka_q 对地下水埋深较为敏感, Ka_q 值越大, 地下水埋深越深, 这与本研究结论相符。Huang 等^[30] 指出地下水埋深较浅的盐渍化区域, Ka_q 值较小, Chang 等^[23] 将河套灌区解放闸灌域的 Ka_q 均值选定为 $6.08 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。本研究区位于解放闸灌域中东部, 地下水埋深较浅, 所选取的 Ka_q 值较为合理。

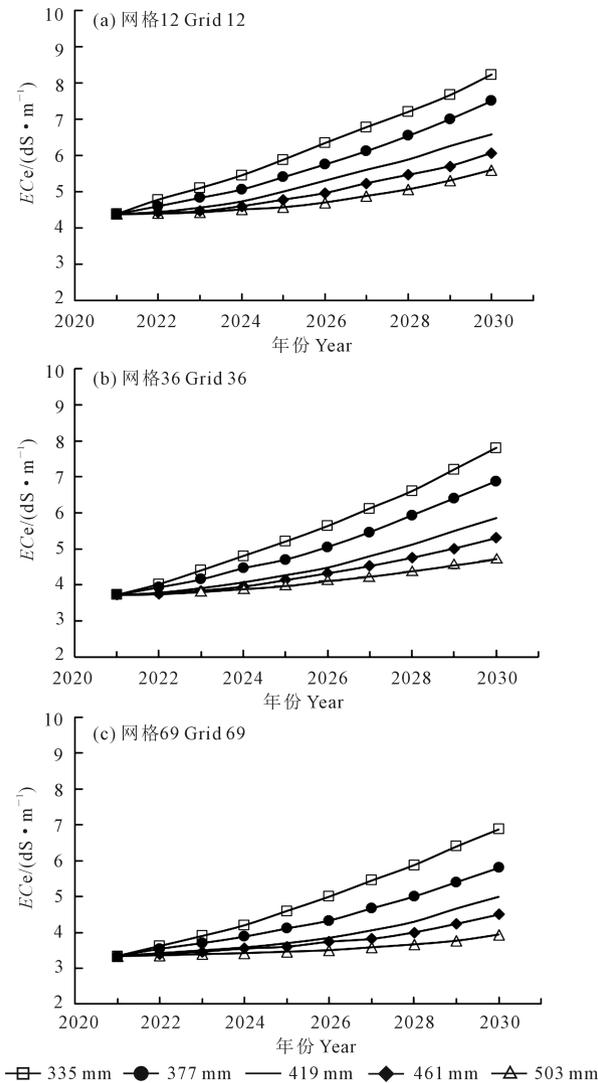


图 8 灌溉定额对季节 1 耕地根区土壤 ECe 值的影响

Fig.8 Effect of irrigation quota on soil ECe in the root zone of cultivated land in Season 1

本研究随机选取典型的耕地网格 12、36、69 和荒地网格 38、41、46, 所选网格基本能够反映研究区耕地与荒地的土壤水盐动态变化。耕、荒地与研究区呈插花分布, 荒地网格 38、41 和 46 分别位于研究区的中部、西北部和东南部, 基本上可以代表整个荒地区域。从耕地与荒地的位置关系考虑, 耕地网格 12、36、69 在研究区呈随机分布, 选取的耕地网格 36 距离荒地网格 38 较近, 耕地网格 69 距离荒地网格 46 较近, 而其余耕地和荒地网格相距较远, 可以反映荒地与人耕地的不同位置关系对灌排管理的响应。

3.2 灌区盐分控制与排水系统优化策略

灌溉水量在保证作物生长的前提下, 还需要通过淋洗盐分进入地下水中, 通过排水系统排走研究区累积的盐分。当排水系统运行不畅时, 干排盐能作为灌区控制盐分的有效替代方法。引水量会影响耕地的灌溉定额, 灌溉定额直接影响土壤盐分的淋洗效果, 同时间接影响地下水位, 浅层地下水系统可能会引起土壤盐渍化等问题, 但也为灌溉水的重新分配和利用提供了途径, Konukcu 等^[32] 指出浅埋深地下水位和强烈的蒸发能力是使干排盐发挥有效作用的前提条件, 应正确看待浅埋深地下水系统为灌区盐渍化问题带来的积极和消极影响, 适宜的灌水量既要保证盐分淋洗效果, 又要防止地下水位过高。

在本研究的预测初期, 由于研究区现有的灌排系统配套不完善, 干排盐发挥了重要作用, 区域内的盐分主要累积在荒地中, 而耕地根区土壤 ECe 值相对较低, 变化不明显。随着时间的推移, 荒地中的盐分逐渐积累, 当达到承载上限后, 干排盐的效率开始下降, 耕地盐分积累会明显增加, 荒地盐分变化开始趋于稳定。若维持灌排单元能够长久健康运转, 还需排除耕地历史累积的盐分, 而现有的灌排模式无法完全解决这一问题, 无法保证耕地盐分的彻底排除。根据现有灌排条件以及模型模拟结果, 减少引水总量对耕地脱盐效果有限, 提高灌溉定额仍是增强土壤盐分淋洗、维持排水排盐效果的重要措施。

明沟排水是河套灌区重要的排盐方式, 相关研究表明, 适当增大排水沟深度, 在一定程度上可增大排水排盐的能力, 能有效减少根层盐分的累积, 保证作物生长。常晓敏^[31] 认为河套灌区解放闸灌域排水沟大于 1.7 m 后, 耕地土壤盐分呈明显减小趋势, 且排水沟越深, 排出区域的盐分越多; 陈艳梅等^[27] 认为解放闸灌域沙壕渠灌域排水沟深度达到 3 m

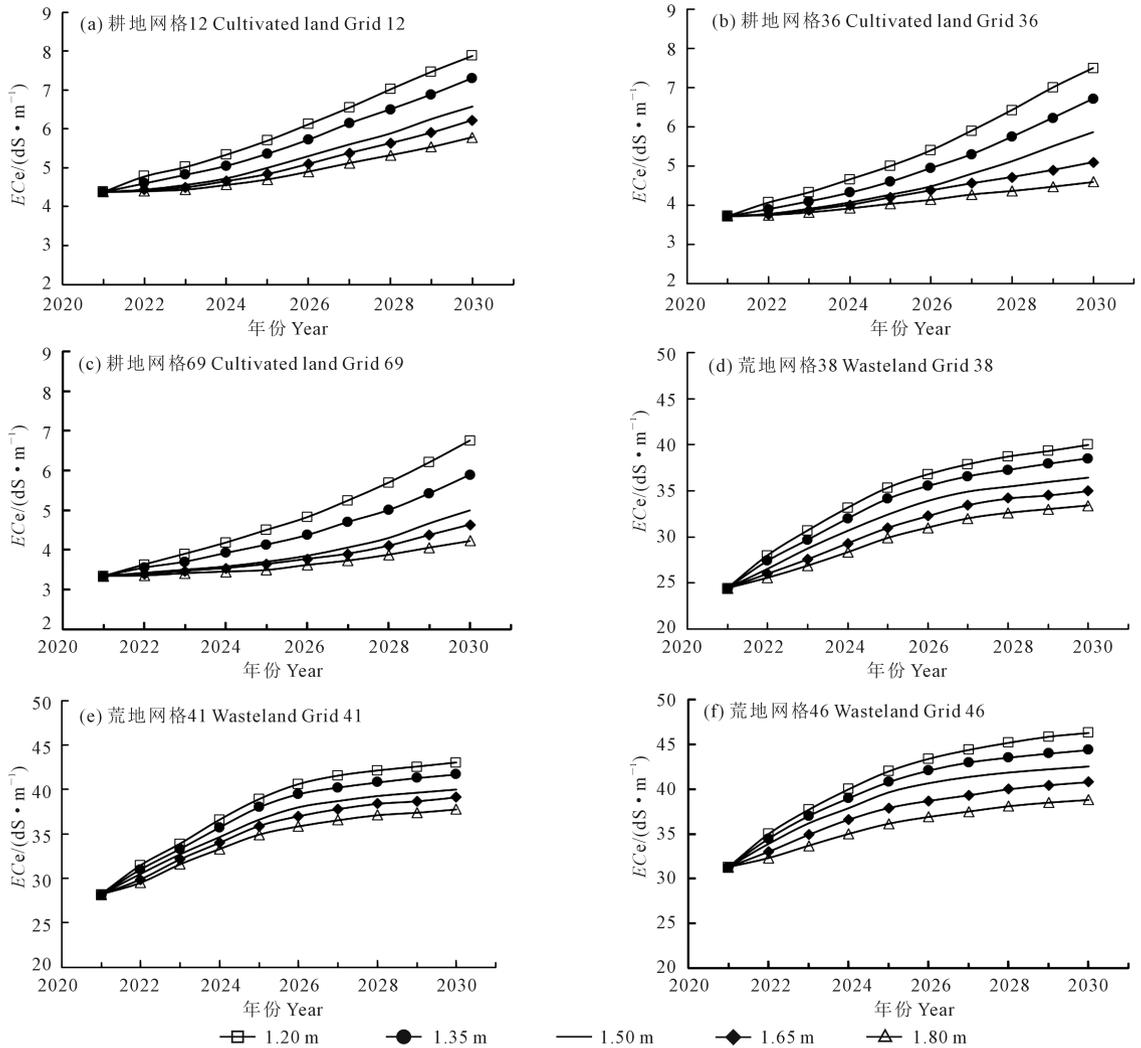


图9 排水沟深度对季节1耕地和荒地土壤电导率的影响

Fig.9 Effect of drainage ditch depth on soil conductivity of cultivated land and wasteland in Season 1

时,根层土壤盐分基本保持不变;翟中民等^[33]则推荐解放闸灌域排水沟深度为1.5~2.0 m。然而过分加深排水沟会削弱干排盐作用^[34]。在设计排水沟深度时,应综合考虑研究区耕荒地土壤条件及盐分累积情况,排水沟加深会导致更高的工程成本和更低的土地利用效率,参考以往研究并结合本研究区实际情况,为实现土壤盐分降低及经济效益最大化,推荐研究区排水沟深度为1.8 m。

3.3 SahysMod 模型的应用及优化方向

经过率定和验证的 SahysMod 模型能够准确反映区域土壤的实际状况和空间变异性,考虑作物种植制度的不同所引起的灌溉与排水的影响,可用于模拟和预测河套灌区的土壤盐分、引水量、灌溉水量及地下水埋深等关键指标,多项研究已证实该模型在西北干旱半干旱地区的应用效果良好。黄亚捷等^[22]以中国宁夏银北灌区为例,利用 SahysMod 模型探索在土地整治过程中不同灌排管理下未来

一定时期内土壤水盐动态变化;Chang 等^[23]等也验证 SahysMod 模型能够预测河套灌区土壤盐分时空变化;Zhang 等^[35]选取了耕荒地交错分布且土壤盐渍化变异性较强的区域,并基于 SahysMod 模型实现了区域水盐动态模拟与预测。以上研究均证实 SahysMod 模型在中国西北干旱半干旱地区水盐的模拟及预测当中取得了较好效果。

研究成果可为农户和决策者制定水资源管理政策、优化灌溉管理和改进灌排基础设施提供科学依据,同时模型 SahysMod 模型在模型参数、空间尺度和长期预测上存在着局限性,例如模型需要较多监测数据,不能充分反映水盐运动过程响应机制,也不能详细解释水盐在土壤-作物-大气连续体中的物理过程,而且长期预测过程中难以准确捕捉动态变化的环境因素,且受累积误差的影响,预测结果的精度会随着时间推移逐渐降低。未来可以考虑将 SahysMod 模型与水盐运移模型相结合,同时结

合实时监测数据,动态调整模型中的关键参数,既可以在考虑到不同网格空间变异性的情况下解释土壤水盐运移过程机理,又可以减少长时间模拟中的累积误差。从而实现对大区域土壤水盐运动的宏观把握及定量化认识。

4 结 论

1) 2021—2025 年耕地根区土壤 EC_e 增长 13.38%, 2026—2030 年增长 34.4%, 地下水埋深和排水矿化度也呈上升趋势。引水总量减少导致耕地根区土壤 EC_e 上升, 脱盐效果不佳, 维持必要淋洗水量至关重要。荒地引水调整不敏感, 建议维持现状引水总量。减少灌溉定额会加速盐分积累, 提高定额可延缓盐渍化, 但需考虑水资源限制, 建议保持 419 mm 灌溉定额。将排水沟深度加深至 1.8 m 可有效减少盐分积累, 改善排盐与作物生长。

2) SahysMod 模型能够较好地模拟研究区土壤水盐动态, 但未来研究仍需优化模型参数, 增强其对土壤-作物-大气连续体中物理过程的模拟能力。此外, 模型在长期预测中对动态环境因素的捕捉不够准确, 影响了模拟精度。未来可以结合实时监测数据和更复杂的水盐运移模型, 将有助于进一步提升预测的可靠性和准确性。

3) 本研究再次强调了土壤盐渍化防治对河套农业生产的重要性。在水资源日益紧张背景下, 现有灌排系统难以长期维持耕地健康, 排水滞后导致盐分累积, 荒地在干排盐中发挥调节作用。优化灌排管理可有效减缓耕地和荒地的盐分累积, 提高农业生产效率。通过科学合理的土壤盐渍化防治方法, 河套灌区的长期可持续发展将得以实现, 这与研究初衷相呼应, 进一步突显了本研究的现实意义。

参 考 文 献:

[1] EISHOEI E, NAZARNEJAD H, MIRYAGHOUBZADEH M. Temporal soil salinity modeling using SaltMod model in the west side of Urmia hyper saline Lake, Iran[J]. *Catena*, 2019, 176: 306-314.

[2] WEN Y Q, SHANG S H, KHALIL U R, et al. A semi-distributed drainage model for monthly drainage water and salinity simulation in a large irrigation district in arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105962.

[3] 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展望[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 1-17.

SHI H B, YANG S Q, LI R P, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao irrigation district: current state and future prospect[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 1-17.

[4] 张文聪. 河套灌区典型斗渠灌排单元农业水文过程与干排盐系统优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.

ZHANG W C. Research on the optimization of agricultural hydrological processes and dry drainage salt system in typical Douqu irrigation and drainage units of Hetao irrigation area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.

[5] 张文聪, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区典型区土壤水-地下水动态与转化关系研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 352-362.

ZHANG W C, SHI H B, LI X Y, et al. Dynamic and transformation relationship between soil water and groundwater in typical areas of Hetao irrigation district[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 352-362.

[6] REN D Y, XU X, HAO Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin: application to maize, sunflower and watermelon[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 532: 122-139.

[7] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 26-31, 391.

DU J, YANG P L, LI Y K, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao irrigation district [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 26-31, 391.

[8] 余根坚, 黄介生, 高占义. 基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J]. *水利学报*, 2013, (7): 826-834.

YU G J, HUANG J S, GAO Z Y. Study on water and salt transportation of different irrigation modes by the simulation of HYDRUS model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, (7): 826-834.

[9] LI G, ZHANG C L, HUO Z L. Reconciling crop production and ecological conservation under uncertainty: a fuzzy credibility-based multi-objective simulation-optimization model[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162340.

[10] 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.

SHI H B, GUO J W, ZHOU H, et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 268-278.

[11] XIONG L Y, JIANG Y, XXINYI L I, et al. Long-term regional groundwater responses and their ecological impacts under agricultural water saving in an arid irrigation district, upper Yellow River basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 288: 108493.

[12] XU X, HUANG G H, SUN C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 125: 46-60.

[13] WU Z S, LI Y, WANG R, et al. Evaluation of irrigation water saving and salinity control practices of maize and sunflower in the upper Yellow River basin with an agro-hydrological model based method [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 278: 108157.

[14] LEI G Q, ZENG W Z, JIANG Y H, et al. Sensitivity analysis of the SWAP (soil-water-atmosphere-plant) model under different nitrogen applications and root distributions in saline soils [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(5): 807-821.

- [15] 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, (9): 66-75.
FENG S Y, JIANG J, HUO Z L, et al. Optimization of irrigation scheduling under deficit irrigation with saline water for spring wheat based on SWAP model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, (9): 66-75.
- [16] LI X M, ZHANG C L, HUO Z L. Optimizing irrigation and drainage by considering agricultural hydrological process in arid farmland with shallow groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124785.
- [17] AKRAM S, KASHKOULI H A, PAZIRA E. Sensitive variables controlling salinity and water table in a bio-drainage system [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2008, 22(3): 271-285.
- [18] SahysMod Working Group of ILRI. SahysMod, Spatial-Agro-Hydro-Salinity model, version 1.7, description of principles, user manual and case studies [M]. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2005.
- [19] SINGH A, PANDA S N. Integrated salt and water balance modeling for the management of waterlogging and salinization II: application of SAHYSMOD [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(11): 964-971.
- [20] YAO R J, YANG J S, WU D H, et al. Scenario simulation of field soil water and salt balances using SahysMod for salinity management in a coastal rainfed farmland[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(5): 872-883.
- [21] INAM A, ADAMOWSKI J, PRASHER S, et al. Coupling of a distributed stakeholder-built system dynamics socio-economic model with SAHYSMOD for sustainable soil salinity management - part 1: model development[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 596-618.
- [22] 黄亚捷, 李贞, 卓志清, 等. 用 SahysMod 模型研究不同灌排管理情景土壤水盐动态[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 129-140.
HUANG Y J, LI Z, ZHUO Z Q, et al. Soil water and salt dynamics under different irrigation and drainage management scenarios based on SahysMod model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 129-140.
- [23] CHANG X M, WANG S L, GAO Z Y, et al. Simulation of water and salt dynamics under different water-saving degrees using the SAHYSMOD model[J]. Water, 2021, 13(4): 1939.
- [24] OOSTERBAAN R J. SAHYSMOD, description of principles, user manual and case studies[Z]. 2005.
- [25] MAO W, YANG J Z, ZHU Y, et al. Loosely coupled SaltMod for simulating groundwater and salt dynamics under well-canal conjunctive irrigation in semi-arid areas[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 209-220.
- [26] YAO R J, YANG J S, WU D H, et al. Calibration and sensitivity analysis of sahyssmod for modeling field soil and groundwater salinity dynamics in coastal rainfed farmland [J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(3): 411-427.
- [27] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 基于 SALTMOD 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 11-16.
CHEN Y M, WANG S L, GAO Z Y, et al. Effect of irrigation water mineralization on soil salinity based on SALTMOD model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 11-16.
- [28] OLUWASEUN T F, AYODELE E A, TOJU B, et al. Modelling crop evapotranspiration and water use efficiency of maize using artificial neural network and linear regression models in biochar and inorganic fertilizer-amended soil under varying water applications [J]. Water, 2023, 15(12): 2294.
- [29] 童文杰, 陈中督, 陈阜, 等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 131-137.
TONG W J, CHEN Z D, CHEN F, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 131-137.
- [30] HUANG Y J, MA Y B, ZHANG S W, et al. Optimum allocation of salt discharge areas in land consolidation for irrigation districts by SahysMod[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107060.
- [31] 常晓敏. 河套灌区水盐动态模拟与可持续性策略研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
CHANG X M. Research on water and salt dynamic simulation and sustainable strategy in Hetao irrigation area[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [32] KONUKCU F, GOWING J W, ROSE D A. Dry drainage: a sustainable solution to waterlogging and salinity problems in irrigation areas? [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1/2): 1-12.
- [33] 翟中民, 史文娟, 郭建忠, 等. 基于 SaltMod 模型的河套灌区解构闸灌域土壤盐分综合调控措施[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 314-318, 325.
ZHAI Z M, SHI W J, GUO J Z, et al. Study on comprehensive control measures of soil salinity in Jiefangzha irrigation area of the Hetao irrigation district based on SaltMod model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 314-318, 325.
- [34] WANG C S, WU J W, ZENG W Z, et al. Five-year experimental study on effectiveness and sustainability of a dry drainage system for controlling soil salinity[J]. Water, 2019, 11(1): 111.
- [35] ZHANG W C, SHI H B, LI Z, et al. Redistribution mechanism for irrigation water and salinity in typical irrigation and drainage unit in the Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2022, 148(7): 04022021.