

▪ 水土资源与环境 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)04-0081-11

基于SahysMod模型的节水条件下 河套灌区水盐动态模拟

常晓敏^{1,2}, 刘思好¹, 王少丽^{1,2}, 管孝艳^{1,2*}, 陈皓锐^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2.国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要:【目的】探明不同节水条件下河套灌区水盐动态的长期演化趋势, 为河套灌区适宜节水规模及灌排管理提供数据支撑。【方法】以河套灌区为研究对象, 综合考虑气象、水文地质、土壤、灌溉、作物等多因素的空间变异性, 结合 SahysMod 分布式模型与 GIS 软件, 基于 2007—2012 年和 2013—2016 年的实测数据对模型进行率定及验证, 模拟不同情景方案下的水盐动态变化。【结果】在现有灌排条件下, 年排水量呈先减小后逐渐稳定的趋势, 年排水量平均值为 5.31 亿 m³; 灌区中上游耕地土壤盐分轻微减小, 下游明显增加; 综合考虑灌区节水与下游乌梁素海生态环境需水, 灌区未来引水量在现有基础上最多可减少 15%, 最多可节约 6.46 亿 m³ 水量; 若田间灌溉量维持不变, 渠系水利用系数 (η) 最多可提高 17.6%; 当总引水量的削减量相同时, 田间灌溉量削减方案对提升灌区排盐能力效果较佳。因此, 可优先考虑减少田间灌溉量, 其次提高 η 。【结论】在灌区规模节水的同时, 需综合考虑下游生态环境需求, 结合灌区实际生态补水条件确定最佳用水管理方案。

关键词: SahysMod; 水盐动态; 空间变化; 灌区节水; 灌排管理

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022352

OSID:



常晓敏, 刘思好, 王少丽, 等. 基于 SahysMod 模型的节水条件下河套灌区水盐动态模拟[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 81-91.

CHANG Xiaomin, LIU Siyu, WANG Shaoli, et al. Using Semi-distributed Hydrological Model to Improve Water and Salt Management in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 81-91.

0 引言

【研究意义】干旱缺水与土壤次生盐渍化是河套灌区可持续发展面临的双重困境。近 20 年来, 随着一系列节水灌溉措施的实施, 灌区水资源短缺问题得到了一定缓解, 但在节水的同时也使得灌区农田水土环境发生变化, 引起土壤水盐的重新分布。正确认识节水条件下区域水盐关系及运动规律是调控土壤水盐运移的关键, 尤其是在水资源紧缺及土壤盐渍化较为严重的干旱半干旱区, 合理的灌溉排水管理对于节水控盐至关重要^[1]。【研究进展】目前, 围绕灌区节水灌溉、土壤盐渍化影响因素及演变特征、农田水盐运移等方面已有大量研究^[2-3]。关于灌区盐渍化动态变化及主要影响因素的研究多以盐渍化土地面积变化情况或田间尺度上土壤盐分变化特征为研究重点^[4],

缺少长时间序列及区域尺度土壤盐分变化及影响因素的研究。由于灌区农田受降水、蒸发、地下水位等因素的共同影响, 且各影响因素交叉耦合, 造成区域水盐运移的复杂性和多变性。此外, 规模化节水改造的实施使得灌区水循环和地下水埋深发生了较大变化, 造成耕地及盐荒地的土壤水盐在垂直剖面以及水平方向上的重分布。因此, 有必要开展长时间序列及区域尺度土壤盐分定量模拟及影响因素的分析, 明确长期节水条件下区域水盐动态的迁移规律。【切入点】尽管目前国内外已构建了一系列土柱和田间尺度上的水盐模型^[5-7], 但这些模型所需输入数据较多, 无法充分考虑灌区气象、水文地质、土壤、灌溉、作物、地下水等多要素的复杂空间变异性, 对区域尺度上的盐渍化研究构成一定挑战, 尤其是在耕荒地交错分布和土壤盐渍化时空变异较大的区域。SahysMod 模型是一个能够用于区域尺度水盐动态模拟与预测的空间分布式水盐平衡模型, 已被成功应用于多个地区并取得较好效果^[8]。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以河套灌区为研究对象, 以节水条件下灌排扰动

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109073); 青海省基础研究项目(2021-ZJ-709)

作者简介: 常晓敏(1988-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事农业水土资源与环境研究。E-mail: changxm@iwhr.com

通信作者: 管孝艳(1979-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事农业水土资源与环境研究。E-mail: guanxy@iwhr.com

对水盐动态的影响为研究主线,采用 SahysMod 分布式模型与 GIS 相结合的方法,探讨不同节水条件下区域长期水盐动态变化情形,进一步了解规模节水对区域水盐动态变化的影响,以期对灌区选择适宜的节水规模和技术措施提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区地处干旱半干旱大陆性季风气候区。总面积为 $1.073 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中灌溉面积为 $5.74 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[9],是我国重要的商品粮油生产基地。该地区日照充足,干旱少雨,蒸发强烈,多年平均蒸发量为 2 100~2 300 mm,而年平均降水量为 130~210 mm,大部分降水集中在 7—9 月,占总降水量的 70%。引黄水量是灌区农业灌溉用水的主要来源,灌溉水平平均矿化度为 0.62 g/L。灌区内作物种类繁多,耕荒地交错分布。灌区地处平原地区,自然排水条件较差,加之多年大水漫灌导致区域地下水位较高,在强蒸发作用下,土壤盐分不断向表层聚积,导致土壤次生盐渍化。

1.2 数据来源及处理

灌区渠系及采样点空间分布如图 1 所示。灌区内设有地下水观测井 248 眼,分布在一干、解放闸、永济、义长和乌拉特灌域的井数分别为 18、57、68、75、30,每隔 5 d 观测 1 次地下水埋深,其中有 91 眼井同步观测地下水矿化度,观测频率为 1 次/50 d。每年灌水前在土壤剖面按 20 cm 间隔分层采样,进行土壤含盐量的测定。

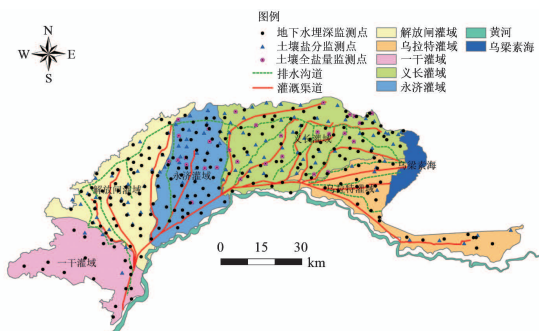


图 1 研究区位置及采样点空间分布

Fig.1 Location of the study and the spatial distribution of sampling point

模型中的土壤盐分输入值采用田间土壤含水率达到饱和状态时的土壤电导率 (EC) 表示, EC 通过土壤饱和浸提液电导率 EC_e 估算,换算关系为 $EC=2EC_e$ ^[10]。 EC_e 参考河套灌区相关研究通过 $EC_{1:5}$ 值进行换算^[11], $EC_{1:5}$ 为土水比 1:5 浸提液的电导率值。灌溉水、排水、地下水的矿化度以 EC 表示,单位为 dS/m,其中 $1 \text{ g/L}=1.7 \text{ dS/m}$ 。降水量来自研究区气象站实测数据,作物蒸散发采用 FAO-56PM 公式、

作物系数法以及加权平均法计算^[12],灌溉量通过各灌溉控制面积单元末级渠道的放水量确定。

1.3 研究方法

1.3.1 模型介绍

SahysMod 模型是通过多边形网络对区域土壤水盐空间变异进行划分的 3D 平衡模型,适用于不同水文地质条件、管理措施以及作物轮作类型等,可用于较大尺度区域的水盐动态模拟^[13]。模型以季节性时间步长作为输入,所需参数较少,可将 1 年划分为 4 个模拟季节,每个季节的长短依据其持续的月份确定。在垂直方向上分为地表层、根系层、过渡层、含水层 4 个均衡体。每层均有水量和盐分的平衡方程,盐分平衡方程是基于各层次的水平衡方程及盐分量而建立,地下水流动是基于有限差分法确定,详细的水盐平衡方程及地下水流动计算参考以往研究^[9,12,14]。

1.3.2 研究区网格划分

本研究在 SahysMod 模型中共设置了 299 个网格,每个网格面积为 $7\ 800 \times 7\ 800 \text{ m}^2$,编号 1~216 和编号 217~299 分别为内部和外部网格(图 2)。模型将每个网格作为一个单独的处理单元,将网格相邻关系、中心点坐标、含水层底部高程、地表高程、根层和过渡层厚度等数据输入模型。假设每个内部网格的基本参数一致,参与模型计算,外部网格为研究区边界,不参与模型计算,由于研究区边界为封闭灌渠及排水沟,根据以往研究假设此条件下的研究区外部边界为定水头边界条件^[14]。

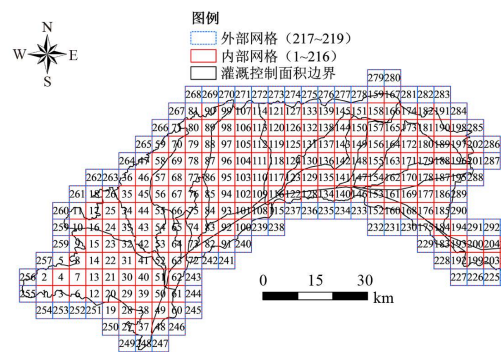


图 2 SahysMod 模型多边形网格设置

Fig.2 Nodal network dividing the experimental sites for SahysMod model

模型中网格的比例尺设定为 1:10 000,预测周期为 10 a。根据河套灌区灌溉气象条件,将全年划分为 3 个时期,即生育期(5—9 月)、秋浇期(10—11 月)和非生育期(12 月—次年 4 月)。主要种植作物为葵花、小麦、玉米、瓜菜、油料等。模型可根据作物种植情况、灌溉方式等条件将每个时期划分为 3 种不同类型的农业区, A、B、U 为各区域所占总面积的比例,其中 $A+B+U=1$,每类区域包括一种或多

种土地利用类型的组合,图3为3种不同农业类型的水文要素示意。本研究主要探讨节水条件下区域耕地及盐荒地盐分动态变化情况,因此,概化A为耕地(包括所有作物类型)、B为盐荒地、U为除耕地及盐荒地外的其他类型用地。A、B、U的空间分布以研究区土地利用遥感解译结果为基础,将2007年和2016年土地利用遥感解译结果分别代表2007—2011年和2012—2016年的总体情况,然后通过GIS数据处理及提取功能,确定每个网格A、B、U的比例。

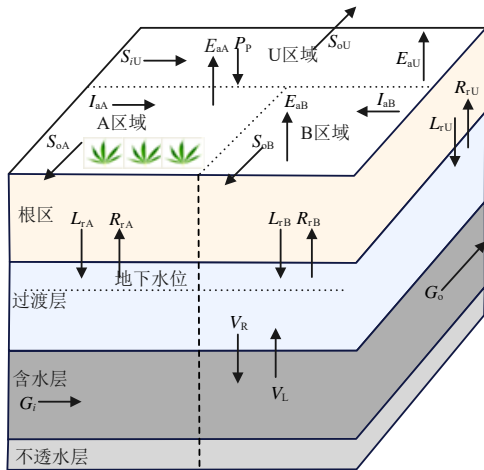


图3 SahysMod模型不同农业种植区水文要素示意

Fig.3 Schematic diagram of hydrological elements in different agricultural planting areas of SahysMod model

1.3.3 模型验证指标

采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)评价模拟效果,计算式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{N}}, \quad (1)$$

$$RE = \frac{|X_{sim,i} - X_{obs,i}|}{X_{obs,i}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $X_{sim,i}$ 为模型计算值; $X_{obs,i}$ 为实测值; N 为样本数量。实际计算RE时,采用各季度年平均值进行计算。

1.3.4 情景方案设置

由于节水程度不同,区域灌溉量、渗漏水补给量、排水量等因素各异,假设研究区灌溉总面积不变,地下水开采量不变,设置不同的情景方案如下:

1) 现状灌排条件: 现状灌溉量采用2014—2016年各灌溉控制区内灌溉量的平均值,在模型输入中按网格灌溉量分别输入。生育期和秋浇期216个内部网格灌溉量平均值分别为 $2\,580\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $1\,510\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。蒸发量采用2014—2016年各网格平均值,降水量采用各气象站2007—2016年的年平均值。种植结构、土壤盐分、地下水电导率、地下水埋深采用2016年4月的数据为基准,引黄灌溉水矿化度约为 0.62 g/L (1.05 dS/m),末级排水沟深和间距分别为1.5 m和

100 m。其他资料与模型验证期相同。

2) 灌区总引水量减少: 假设灌区现状种植结构、渠道衬砌率、田间节水措施等条件不变,设置总引水量(W)分别减小5%、10%、15%、20%的4种方案。

3) 渠系水利用系数(η)提高: 保持灌区总引水量及其他条件不变,在各灌域现状 $\eta=0.53$ 基础上,设置 η 分别增加10% (0.59)、20% (0.64),灌区现状 η 值参考《内蒙古引黄灌区灌溉水利用系数效率测试分析与评估》报告中的取值。

4) 不同灌溉定额: 假设 η 等条件不变,设置不同的生育期和秋浇期灌溉定额,即假设末级渠道进入田间的灌溉量不同。在各网格单元现状灌溉定额的基础上,设置生育期灌溉定额(WS)和秋浇期灌溉定额(WQ)分别减少20%和10%,增加10%和20%的4种方案。

2 结果与分析

2.1 模型率定验证

2.1.1 输入数据确定

各季节气象、灌溉排水、土壤盐分、地下水盐等基础输入数据均为研究区实测值。部分影响土壤盐分、地下水埋深、排水量等因素的土壤储存效率及排水率参数参考相关地区经验取值或文献确定^[8,15-16]。其中, F_{lr} 和 F_{lx} 分别为根区和过渡层渗漏水的盐分质量浓度与饱和土壤水的平均盐分质量浓度的比值,取值范围为0~1,取值参考解放闸灌域研究结果, F_{lr} 和 F_{lx} 分别取0.85和0.65^[12],不考虑其空间变异性。含水层淋洗率 F_{lq} 为从含水层渗漏出的溶液盐分质量浓度与含水层饱和时的平均盐分质量浓度的比值,由于此参数通过试验测量较难获取,需要通过模型模拟与实测值拟合确定。SahysMod模型基本参数和季节性输入值见表1和表2。

2.1.2 SahysMod模型率定验证

模型采用2007—2012年的数据进行率定,采用2013—2016年的数据进行验证。其中 F_{lq} 的取值范围为0.01~2.0,参考以往研究文献选取不同的 F_{lq} 值(0.4、0.6、0.8、1.0、1.2),对比地下水电导率模拟值与实测值^[8,16]。随机选取多边形网格29和网格33率定 F_{lq} (图4)。当 F_{lq} 取0.95时,网格29和网格33的RMSE分别为0.33 dS/m和0.93 dS/m,地下水电导率的模拟值与实测值吻合最好。Yao等^[16]认为在江苏雨养农田试验区的 F_{lq} 为1.2时,地下水电导率模拟与实测值吻合度最好。通过SahysMod模型发现, F_{lq} 值越大,地下水电导率越高,但不同 F_{lq} 值对研究区地下水埋深和排水量均无影响,这与以往研究一致^[16]。

表 1 SahysMod 模型基本参数输入

Table 1 Summary of input parameters for use with SahysMod model

多边形网格输入参数		参数取值	数据来源
地表水层厚度	Thickness of the surface reservoir/m	0	S
根层厚度	Thickness of the root zone/m	1	S
过渡层厚度	Thickness of the transition zone/m	4	S
含水层厚度	Thickness of the aquifer zone/m	90	S
第一季灌溉面积比例 (网格平均值)	Irrigated area fraction in season 1	0.57	R
第二季灌溉面积比例 (网格平均值)	Irrigated area fraction in season 2	0.57	R
轮作指数	Rotation ($K_r=0,1,2,3,4$)	1	S
根区总孔隙度	Total porosity of the root zone	0.48	G
过渡区总孔隙度	Total porosity of the transition zone	0.48	G
含水层总孔隙度	Total porosity of the aquifer zone	0.4	G
根区有效孔隙度	Effective porosity of the root zone	0.07	G
过渡区有效孔隙度	Effective porosity of the transition zone	0.07	G
含水层有效孔隙度	Effective porosity of the aquifer zone	0.1	G
根区淋洗效率	Leaching efficiency of the root zone	0.85	C
过渡层淋洗效率	Leaching efficiency of the transition zone	0.65	C
含水层淋洗效率	Leaching efficiency of the aquifer zone	0.95	C
含水层水平导水率	Horizontal hydraulic conductivity of the aquifer zone/($m\ d^{-1}$)	6.08~13.66	S
根区初始土壤盐分	Initial salt concentration of soil moisture in the root zone/($dS\ m^{-1}$)	5.47~6.99	S
过渡层初始土壤盐分	Initial salt concentration of soil moisture in the transition zone/($dS\ m^{-1}$)	4.14~5.70	S
含水层初始土壤盐分	Initial salt concentration of soil moisture in the aquifer zone/($dS\ m^{-1}$)	3.86~6.75	S/K
初始地下水水位	Initial groundwater level with respect to reference level/m	1 005~1 211	S/K
流入含水层的水量	Constant inflow condition into the aquifer/($m\ year^{-1}$)	0	S/G
流出含水层的水量	Constant outflow condition into the aquifer/($m\ year^{-1}$)	0.1	S/G
自然排水量	Natural drainage/($m\ year^{-1}$)	0.1	S/G
产生毛管水上升的地下水埋深临界深度	Critical depth of the groundwater table for capillary rise/m	2.3~2.5	S
排水沟深	Drain depth/m	1.5	S
排水间距	Drain spacing/m	100	S

注 S表示通过实测资料或调研资料计算数据获取; C表示通过模型率定获取; R表示通过遥感解译获取; K表示通过空间插值获取; G表示通过文献获取。

表 2 SahysMod 模型季节输入数据

Table 2 Seasonal input data of SahysMod model

多边形网格输入参数		参数值 (网格平均值)	数据来源
季节 1	Season 1	5—9 月	S
季节 2	Season 2	10—11 月	S
季节 3	Season 3	12 月—次年 4 月	S
降雨量	Rainfall in season 1/season 2/season 3/m	0.119/0.010/0.011	S
灌溉量	Irrigation in season 1/season 2/m	0.258/0.151	S
季节性潜在蒸发量	Seasonal potential evapotranspiration /m	0.695/0.103/0.075	S
灌溉水盐分浓度	Salinity of irrigation water season 1/season 2/season 3/($dS\ m^{-1}$)	1.05	S
季节性地表径流量	Seasonal runoff /m	0	S
根区对降雨和灌溉的存储效率	Rootzone storage efficiency for rainfall and irrigation	0.8	S/G
含水层抽水量	Pumped well water water from aquifer	0	S

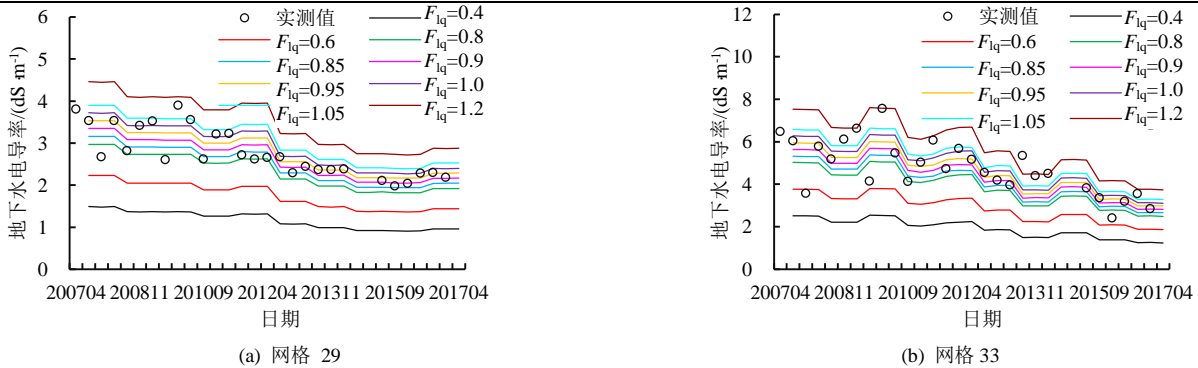


图 4 SahysMod 模型含水层淋洗率 (F_{lq}) 率定

Fig. 4 Calibration of leaching efficiency in the aquifer zone (F_{lq}) for SahysMod

2.1.3 SahysMod 模型的适用性评价

依据季节划分情况,地下水埋深、土壤盐分及排水电导率取每年 9、11、4 月底的模拟值与实测值进

行对比,排水量采用年值进行对比。随机选取网格 14 和网格 29 对比分析地下水埋深的模拟值与预测值,统计指标分析见表 3。率定期网格地下水埋深全年的

$RMSE$ 变幅在 0.16~0.19 m 之间, RE 在 1.83%~5.83% 之间, 验证期地下水埋深全年的 $RMSE$ 变幅在 0.13~0.24 m 之间, RE 在 2.76%~13.16% 之间。年排水量模拟值与实测值对比分析中 R^2 为 0.945, RE 在 0.30%~9.08% 之间, 误差较小 (表 4)。由于受灌区秋浇和冻融的影响, 季节性模拟值误差较大, 但年平均地下水埋深与年排水量的模拟精度明显提高, 模拟效果较好。

表 3 率定期和验证期地下水埋深实测值与模拟值对比

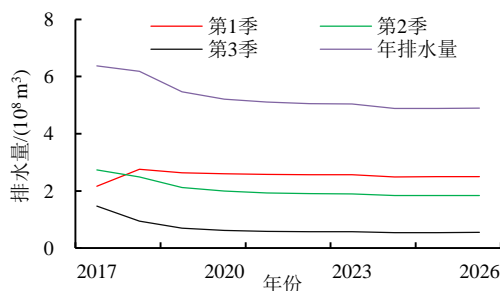
Table 3 Comparison of measured and simulated groundwater depth at calibration and validation periods

网格	时期	季度	地下水埋深			
			实测值/ m	模拟值/ m	$RMSE$ / m	RE /%
网格 14	率定期 (2007— 2012 年)	1	1.90	1.65	0.30	13.57
		2	1.15	1.12	0.21	3.04
		3	1.72	2.29	0.61	33.27
		全年	1.59	1.68	0.19	5.83
	验证期 (2013— 2016 年)	1	1.77	1.77	0.04	0.12
		2	1.29	1.21	0.19	6.48
		3	1.61	2.32	0.74	43.48
		全年	1.56	1.76	0.24	13.16
网格 29	率定期 (2007— 2012 年)	1	2.00	1.53	0.50	23.46
		2	0.96	0.98	0.18	2.78
		3	1.75	2.11	0.40	20.34
		全年	1.57	1.54	0.16	1.83
	验证期 (2013— 2016 年)	1	2.10	1.69	0.43	19.73
		2	1.17	1.13	0.22	4.22
		3	1.72	2.15	0.54	-9.94
		全年	1.67	1.65	0.13	2.76

表 4 率定期和验证期研究区年排水量实测值与模拟值对比

Table 4 Comparison of measured and simulated annual discharge at calibration and validation periods

模拟期	年份	实测值/(10^8 m ³)	模拟值/(10^8 m ³)	RE /%
率定期	2007	5.17	5.63	9.08
	2008	6.28	6.12	2.52
	2009	4.97	5.34	7.53
	2010	5.52	5.68	3.02
	2011	5.00	4.82	3.53
	2012	7.30	7.28	0.24
验证期	2013	5.96	6.05	1.56
	2014	7.45	7.47	0.30
	2015	6.13	6.17	0.70
	2016	6.25	6.20	0.76



(a) 排水量

网格 196 位于灌区总排干沟出口附近, 将其作为灌区代表性排水电导率进行分析 (表 5)。率定期及验证期相对误差 RE 分别在 0.05%~12.48% 和 1.70%~14.83% 之间。由于灌区排水电导率受外界干扰较大, 部分年份模拟值误差较大, 但率定期和验证期排水电导率 RE 平均值为 6.83%, 误差在可接受范围内。

表 5 率定期和验证期研究区年排水电导率实测值与模拟值对比

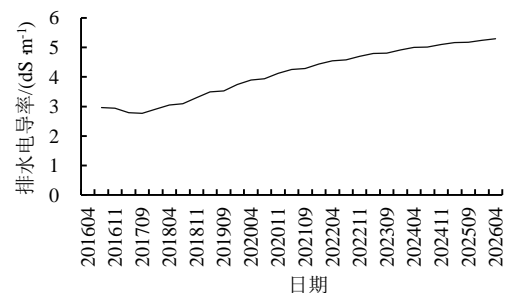
Table 5 Comparison of measured and simulated salt concentrations of the drainage water at calibration and validation periods

时期	年份	观测值/(dS m ⁻¹)	模拟值/(dS m ⁻¹)	RE /%
率定期	2007	4.45	4.36	2.11
	2008	4.47	3.91	12.48
	2009	4.47	4.47	0.05
	2010	4.34	3.94	9.22
	2011	3.94	4.08	3.54
	2012	3.92	3.71	5.40
验证期	2013	3.86	3.79	1.70
	2014	2.67	3.03	13.37
	2015	3.28	3.46	5.62
	2016	2.55	2.93	14.83

2.2 情景方案模拟预测

2.2.1 现状灌排条件

由图 5 可知, 在现状灌排条件下, 未来 10 a 灌区年排水量呈先减小后逐渐稳定的趋势, 年平均排水量为 5.31 亿 m³, 电导率呈明显增加趋势。选取网格 44、77、109 作为灌区上中游代表, 网格 141、155、179 作为下游代表, 其中网格 44、77 位于解放闸灌域, 网格 109 位于永济灌域, 网格 141、155 位于义长灌域, 网格 179 位于永乌拉特灌域。位于灌区中上游的耕地 (网格 44、77、109) 土壤盐分呈轻微减小的变化趋势, 位于灌区下游的耕地 (网格 141、155、179) 土壤盐分呈明显增加趋势, 而盐荒地盐分整体呈增加趋势。这也与河套灌区盐分空间变化情况较为吻合, 受排水条件、地下水埋深等影响, 灌区下游盐渍化整体较为严重^[12]。此外, 受季节性降水和灌溉等影响, 耕地土壤盐分呈明显的季节性波动。



(b) 排水电导率

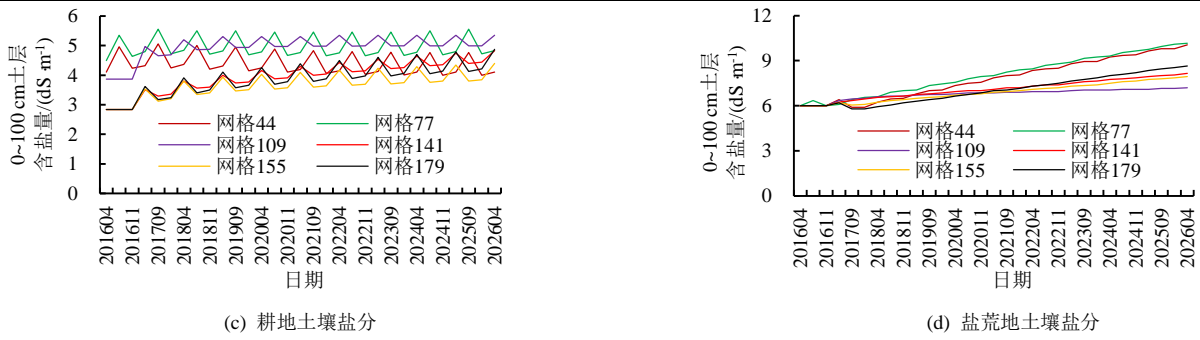


图 5 现有灌排条件下未来 10 a 水盐动态变化

Fig.5 Dynamic changes of water and salt in the next 10 years under the existing irrigation and drainage conditions

2.2.2 总引水量减少方案

如图 6 所示,随着时间的推移,灌区排水量减小,排水电导率及耕地土壤盐分增大。当 W 减小 15% 时,10 a 后灌区年排水量由现状年的 5.31 亿 m^3 减小到 4.00 亿 m^3 ,2016 年 9 月—2025 年 9 月,排水电导率

由 2.97 dS/m 增加到 3.80 dS/m,上游耕地土壤盐分由 4.49 dS/m 增加到 5.90 dS/m,增加了 31.25%,下游耕地土壤盐分由 2.84 dS/m 增加到 4.43 dS/m,增加了 55.98%。

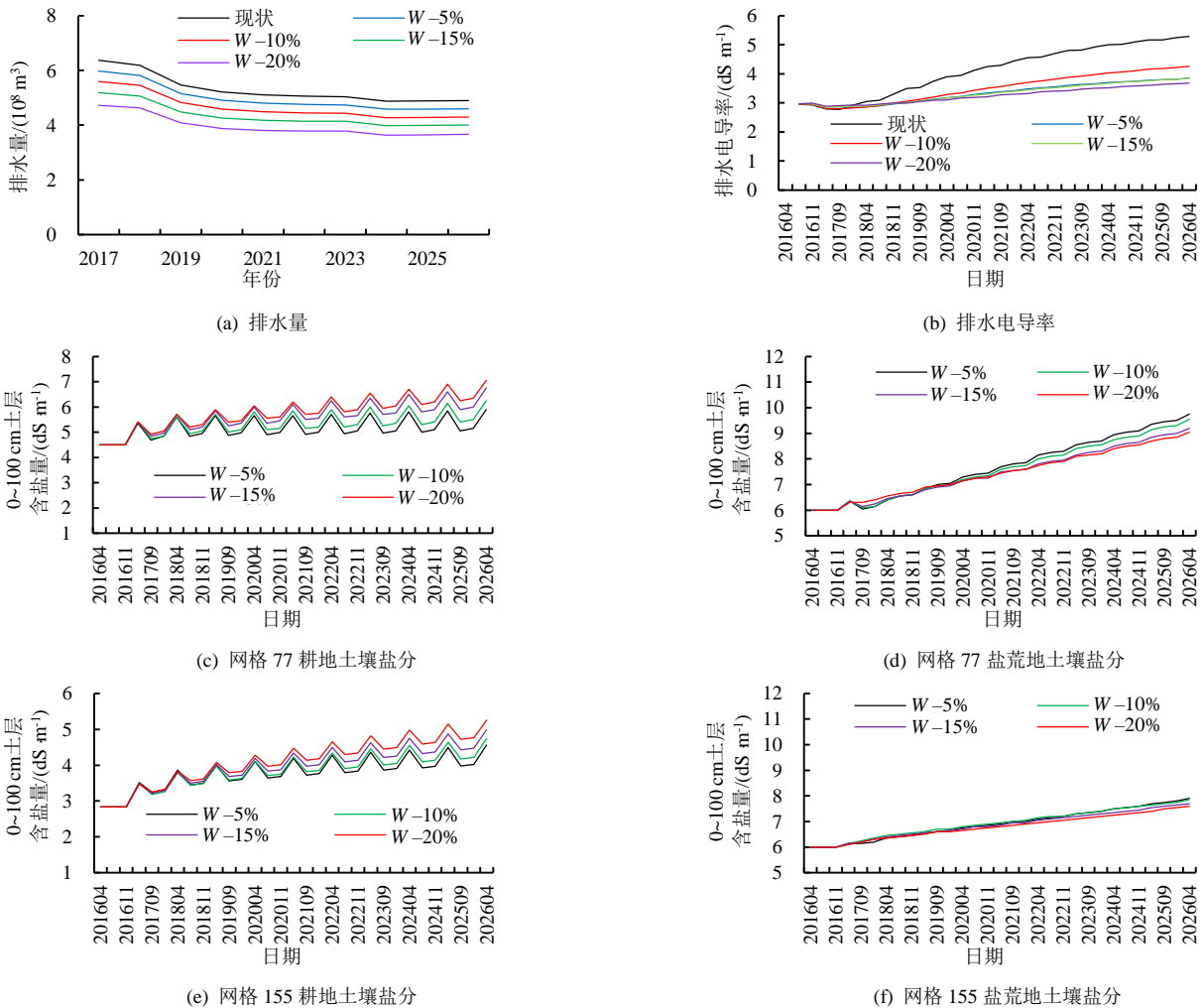


图 6 不同引水量条件下灌区水盐动态变化

Fig.6 Dynamic changes of water and salt under different water diversion quantity

2.2.3 渠系水利用系数提高方案

如图 7 所示,随着时间的推移,灌区排水量呈先减小后趋于稳定的变化趋势,说明当 η 提高到一定程度后,灌区排水量受 η 的影响程度逐渐减小。随着 η 的提高,排水电导率增大,耕地土壤盐分减少。当 η

提高 20% 后,2016 年 9 月—2025 年 9 月,排水电导率由 2.94 dS/m 增加到 6.51 dS/m;上游耕地(网格 77)土壤盐分由 4.49 dS/m 减小到 3.44 S/m,减少了 23.47%,下游耕地(网格 155)土壤盐分由 2.84 dS/m 减小到 2.72 dS/m,减小了 4.22%。

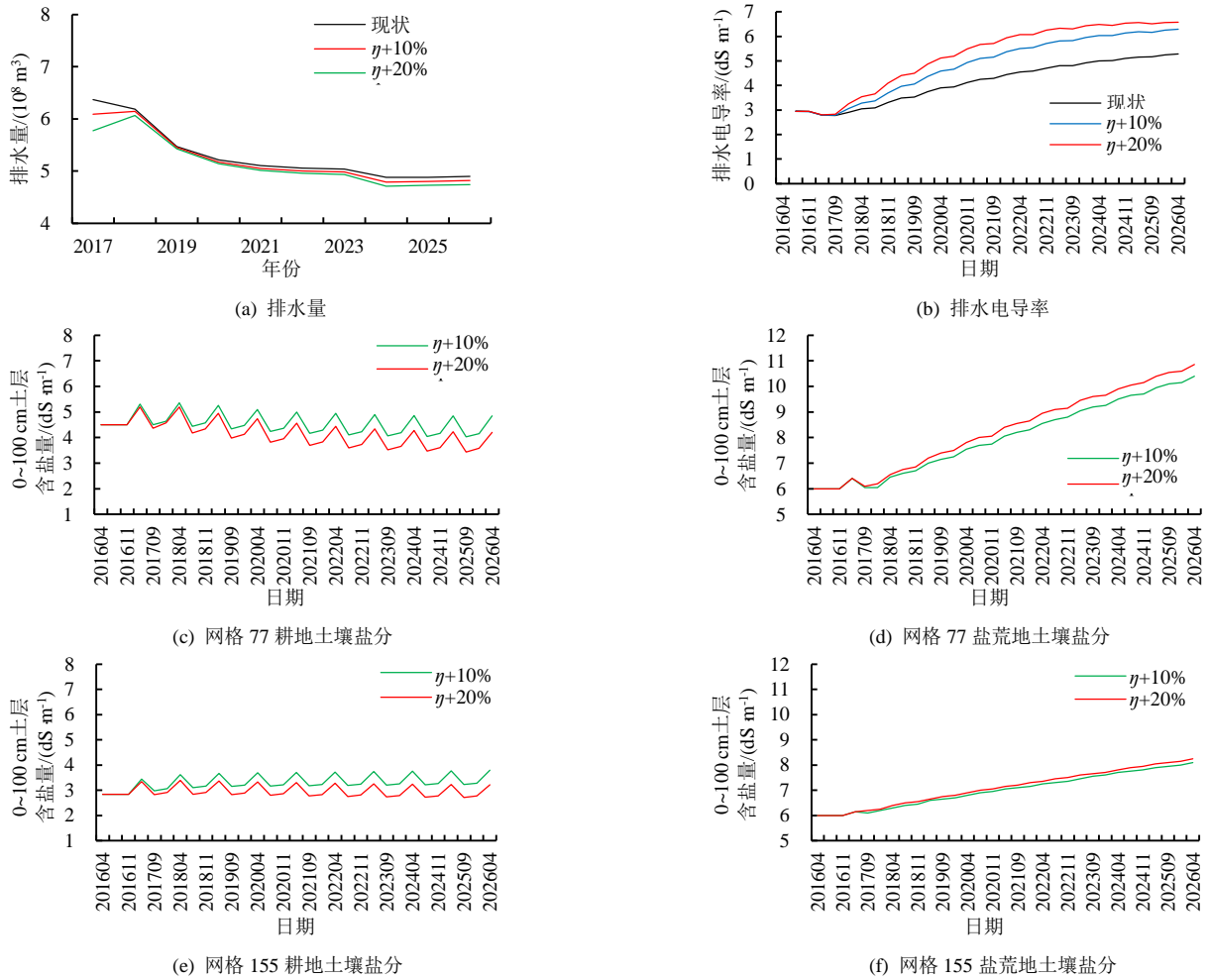


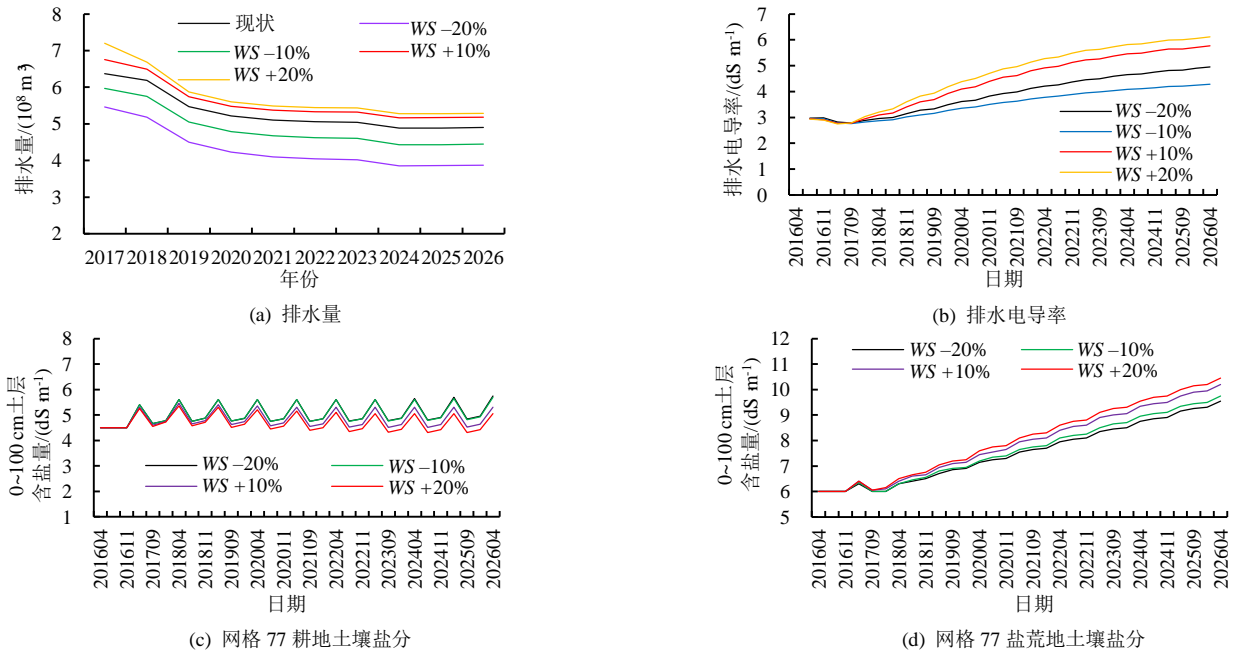
图 7 不同渠系水利用系数条件下灌区水盐动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of water and salt under different water use coefficient of canal system

2.2.4 不同灌溉定额方案

如图 8 和图 9 所示，同一灌溉定额下，未来灌区排水量呈先减少后趋于平稳的变化趋势，随着生育期和秋浇期灌溉定额的增加，灌区排水量增加，排水矿化度升高，短期较大的灌溉量对灌区盐分起到一定的

淋洗作用。整体来看，生育期灌溉定额对耕地土壤盐分的影响相对较小，这与毛威等^[9]研究结果一致。在 WQ-20%、WQ-10%、WQ+20%、WQ+20% 方案下，2016 年 9 月—2025 年 9 月，上游耕地（网格 77）土壤盐分由 4.49 dS/m 变为 5.95、5.25、4.20、3.77 dS/m。



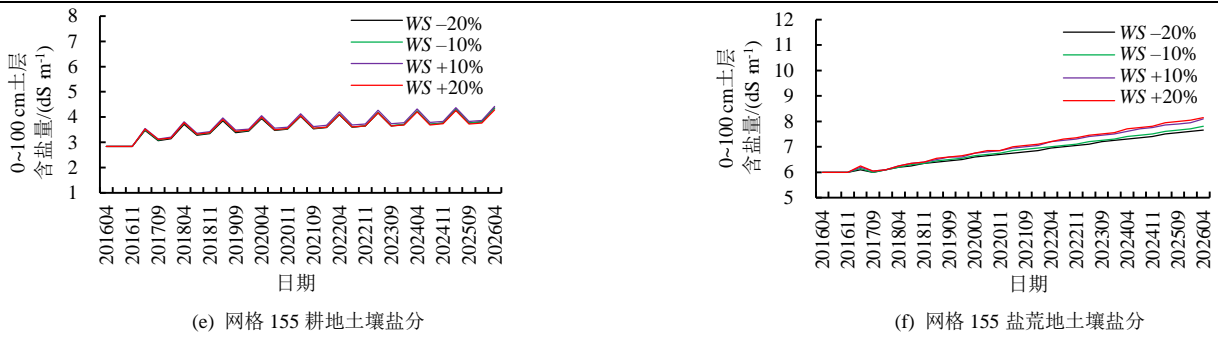


图 8 生育期不同定额条件下灌区水盐动态变化

Fig.8 Dynamic changes of water and salt under different irrigation quota

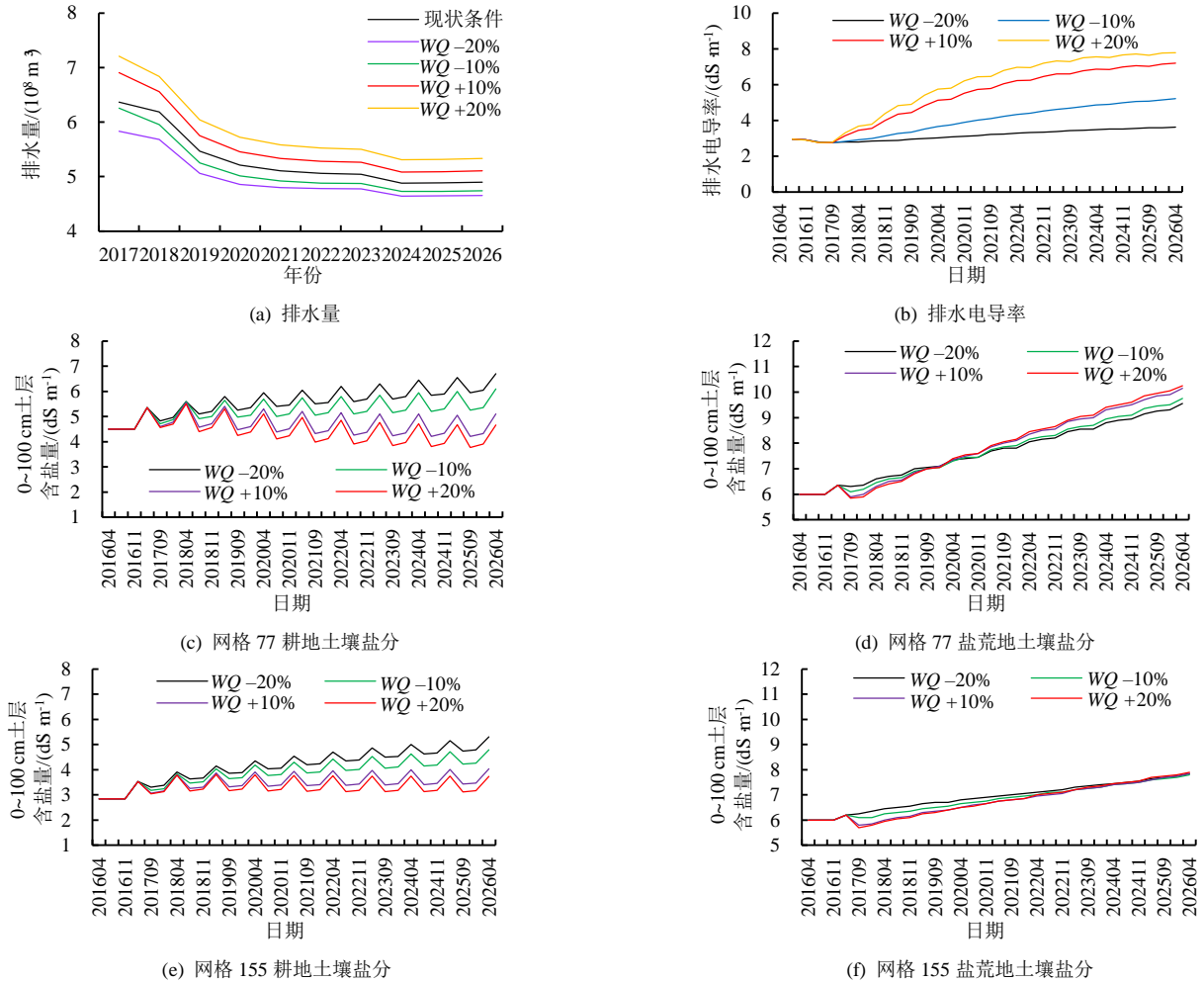


图 9 秋浇期不同定额条件下灌区水盐动态变化

Fig.9 Dynamic changes of water and salt under different autumn irrigation quota

3 讨论

SahysMod 模型可以综合考虑区域土壤、作物、地下水的空间变异性,对灌区土壤水盐、地下水盐、排水排盐等进行模拟,并在干旱半干旱地区得到成功应用^[17-18]。本研究从灌区实际情况出发,以现状条件下灌区引水量、田间灌溉量、渠系渗漏水量及灌区排水量等为基准,对比不同方案下灌区引排水量、节水量等情况。参考《乌梁素海综合治理规划研究》中生态需水量情况,分析了不同方案的效果(表 6),初步提出适宜的节水策略及方案措施。现状条件下,灌

区年净引水量和年平均排水量分别为 43.10 亿 m^3 和 5.31 亿 m^3 ,排水电导率为 2.96 dS/m。当灌区引水量减少 20%时,可节约 8.62 亿 m^3 水量,末级渠道进入田间的灌溉量由现状条件下的 23.18 亿 m^3 减少到 18.55 亿 m^3 ,乌梁素海所需最小补水量增加到 1.96 亿 m^3 。随着引水量的减小,灌区引盐量、排盐量和积盐量均呈减小趋势,会对乌梁素海水环境产生一定影响。当总引水量不变时, η 提高 20%后,10 a 后灌区积盐量相比现状灌排条件下可减少 20.82%。尽管通过各种措施可节约一定的水量,但需综合考虑下游维持乌梁素海现有水面面积和盐分所需的最小生态需水要求,

并结合灌区实际生态补水能力全面综合考虑。当总引水量在现状基础上减少小于 5% (低)、5%~10% (中)、10%~15% (高) 3 个水平时, 对应的灌区所需净水量最小为 40.94 亿、38.79 亿~40.94 亿、36.63 亿~38.79 亿 m^3 , 可节约水量分别为 2.15 亿、2.15 亿~4.31 亿、4.31 亿~6.46 亿 m^3 ; 乌梁素海所需生态补水水量分别为 0.93 亿、0.93 亿~1.26 亿、1.26 亿~1.58 亿 m^3 ; 若保持

田间灌溉量不变时, η 需分别提高 5.3% (0.56)、5.3%~10% (0.56~0.59)、10.0%~17.6% (0.59~0.63)。综上所述, 考虑乌梁素海最小生态需水要求, 引水量最多可减少 15%, 最多可节约 6.46 亿 m^3 的水量。若进一步考虑下游乌梁素海生态环境改善目标需求, 则所需生态需水量将更大, 关于此方面的研究, 还有待进一步开展。

表 6 不同节水方案下水盐平衡分析

Table 6 Water salt balance analysis table of different water-saving schemes

方案	灌区引水量/亿 m^3	渠系渗漏量/亿 m^3	田间灌溉量/亿 m^3	灌区排水量/亿 m^3	乌海需补水量/亿 m^3	灌区积盐量/万 t
现状	43.10	19.91	23.19	5.31	0.61	133.17
$W_{引-5\%}$	40.94	18.92	22.03	4.99	0.93	127.72
$W_{引-10\%}$	38.79	17.92	20.87	4.67	1.26	142.46
$W_{引-15\%}$	36.63	16.92	19.71	4.34	1.58	131.69
$\eta+10\%$	43.10	17.59	25.51	5.23	0.70	115.04
$\eta+20\%$	43.10	15.27	27.82	5.15	0.77	105.44
WS-20%	37.41	17.28	20.13	4.55	1.37	117.02
WS-10%	40.26	18.60	21.66	4.97	0.95	133.30
WS+10%	45.94	21.22	24.72	5.07	0.86	137.65
WS+20%	48.78	22.54	26.25	5.26	0.66	140.04
WQ-20%	40.16	18.56	21.61	4.80	1.13	146.30
WQ-10%	41.63	19.23	22.40	5.00	0.93	126.85
WQ+10%	44.56	20.59	23.98	5.27	0.66	93.65
WQ+20%	46.03	21.27	24.77	5.57	0.35	75.04

当引水量不变时, 未来 η 越高, 田间灌溉量越大, 耕地土壤脱盐效果越好, 灌溉量对耕地土壤盐分影响较大。史海滨等^[19]认为, 灌溉可以对土壤盐分进行有针对性的调控, 进而达到脱盐效果。本研究基于不同灌溉和秋浇定额开展模拟, 发现随秋浇定额的增加, 土壤脱盐效果较好。当秋浇定额在现状基础上减少 10% 和 20%, 增加 10% 和 20% 时, 网格 77 的耕地土壤盐分在 10 a 后可分别增加 16.79% 和 32.36%, 减少 6.45% 和 16.01%, 但当秋浇灌溉定额过大时, 土壤脱盐效果略微减弱。李瑞平等^[6]提出秋浇灌溉可以起到淋洗盐分, 蓄水保墒的作用, 但不适宜的秋浇时间和水量或许还会加剧土壤次生盐渍化并危害作物生长^[19]。陈艳梅等^[20]考虑了节水灌溉、作物生长以及 SaltMod 模型对根层土壤盐分的模拟结果, 提出河套灌区沙壕渠灌域较优的秋浇净灌溉定额为 2 700 m^3/hm^2 。因此, 适宜的秋浇制度应综合考虑灌区节水增效、盐分淋洗、蓄水保墒等效果。

受河套灌区特殊的秋浇冻融影响, 模型在模拟季节性地下水埋深和排水量时精度偏低, 与以往研究相似^[12]。毛威等^[9]基于 SaltMod 模型开展井渠结合区土壤盐分演化规律分析, 结果表明河套灌区地下水矿化度与秋浇频率有较大关系, 且季度地下水埋深模拟与实测值误差最大是在第 1 季度。彭振阳等^[21]研究表明,

秋浇后的排水过程对秋浇期和冻结期的土壤盐分运动规律均有显著的影响, 但由于区域地形和沟渠布置的影响, 不同观测点的排水条件和地下水埋深均有较大差别。SahysMod 模型采用多年平均降水量和灌溉量作为输入条件, 所以模型反映的是长时间情况下的地下水位变化趋势, 并不能反映由降水或灌溉在短期内引起的水位剧烈波动。从长时间序列来看, 模型计算的地下水埋深变化可以反映区域水分运动规律。但由于现有模型不能考虑冻融问题, 在今后研究中, 应考虑耦合冻融模型, 全面认识灌区水盐运移规律。

近年来, 随着引黄水量减少, 灌区节水压力有所增大。节水技术和措施不仅影响灌溉用水量, 还会对灌区下游生态环境造成影响^[22]。种植结构调整是灌区农业节水的重要措施, 不同种植结构的耗水量与灌溉需水量时空分布不同, 会对灌溉引水、地下水补给量、地下水位、渠系渗漏量、农田排水量等各要素带来影响^[23], 进而对区域水盐动态产生一定影响。种植结构调整下农田水盐各要素发生显著变化需要一定的响应时间, 如何定量表达种植结构变化与农田各水盐动态要素的影响仍是一个难点。鉴于种植结构调整与灌溉引水有较为密切的关系, 本研究考虑了不同引水量以及灌溉定额方案下的水盐动态变化情况, 但对不同类型种植结构调整下区域土壤盐分定量变化未进行

考虑, 下一步还需对模型做进一步改进, 增加农业种植区类型划分数量, 考虑不同种植结构调整下区域土壤盐分定量变化。

4 结论

1) SahysMod 模型能够较好地模拟研究区不同节水方案下水盐动态变化情况, 可以对耕荒地交错分布区域的土壤水盐动态变化进行模拟。

2) 现有灌排模式下, 灌区年排水量呈先减小后逐渐稳定的趋势, 年排水量平均值为 5.31 亿 m^3 。灌区中上游耕地土壤盐分量呈轻微减小趋势, 下游呈明显增加趋势。考虑灌区下游乌梁素海生态需水量, 未来引水量最多可减少 15% (节约 6.46 亿 m^3 水量)。若田间灌溉量维持不变, η 可提高 17.6%。

3) 当总引水量的削减量相同时, 灌区排水量受渠系渗漏影响大于田间渗漏, 且田间灌溉量削减方案对灌区排盐提升能力效果较佳。因此, 可优先考虑减少田间灌溉量, 其次考虑提高 η 的方案措施。尽管通过各种措施可节约一定水量, 但需综合考虑灌区下游乌梁素海生态需水要求, 并结合灌区实际生态补水条件分析确定最佳用水管理方案。

参考文献:

[1] LI X M, ZHANG C L, HUO Z L, et al. A sustainable irrigation water management framework coupling water-salt processes simulation and uncertain optimization in an arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 105-994.

[2] 王少丽, 焦平金, 许迪, 等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(7): 623-628.
WANG Shaoli, JIAO Pingjin, XU Di, et al. Variation trends and influencing factors of shallow soil salinity in arid area of Xinjiang[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(7): 623-628.

[3] CHU L L, KANG Y H, WAN S Q. Effect of different water application intensity and irrigation amount treatments of microirrigation on soil-leaching coastal saline soils of North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(9): 2 123-2 131.

[4] IBRAHIMI M K, MIYAZAKI T, NISHIMURA T, et al. Contribution of shallow groundwater rapid fluctuation to soil salinization under arid and semiarid climate[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(9): 3 901-3 911.

[5] QI Z J, FENG H, ZHAO Y, et al. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 219-231.

[6] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 403-412.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akai, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(4): 403-412.

[7] SINGH A. Evaluating the effect of different management policies on the long-term sustainability of irrigated agriculture[J]. *Land Use Policy*, 2016, 54: 499-507.

[8] 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 Yajie, LI Zhen, ZHUO Zhiqing, 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.

[9] 毛威, 杨金忠, 朱焱, 等. 河套灌区并渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 93-101.
MAO Wei, YANG Jinzhong, ZHU Yan, et al. Soil salinity process of Hetao Irrigation District after application of well-canal conjunctive irrigation and mulched drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 93-101.

[10] OOSTERBAAN R J. SALTMOD: description of principles, user manual and examples of application: version 1.1[J]. *Special Report/International Inst. for Land Reclamation and Improvement (Netherlands)*, 2001.

[11] 童文杰, 刘倩, 陈阜, 等. 河套灌区小麦耐盐性及其生态适宜区[J]. *作物学报*, 2012, 38(5): 909-913.
TONG Wenjie, LIU Qian, CHEN Fu, et al. Salt tolerance of wheat in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(5): 909-913.

[12] CHANG X M, GAO Z Y, WANG S L, et al. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156: 447-458.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] YAO R, 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: 872-883.

[17] DESTA Tsegay Fithanegest. Spatial modelling and timely prediction of salinization using SAHYMOD in GIS environment: A Case Study of Nakhon Ratchasima, Thailand[M]. International institute for geo-information science and earth observation (ITC), The Netherlands, 2009.

[18] SINGH A, PANDA S N. Integrated salt and water balance modeling for the management of waterlogging and salinization. I: Validation of SAHYSMOD[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(11): 955-963.

[19] 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 Haibin, GUO Jiawei, ZHOU Hui, 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.

[20] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 不同灌溉制度对根层土壤盐分影响的模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(3): 263-270.
CHEN Yanmei, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Modeling effects of different irrigation managements on root-zone soil salinity[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(3): 263-270.

[21] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 77-81.

- PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Salt movement of seasonal freezing-thawing soil under autumn irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 77-81.
- [22] XU X, HUANG G H, QU Z Y, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River Basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2): 301-313.
- [23] 付雯琪, 翟家齐, 赵勇, 等. 河套灌区种植结构变化对农田系统水量平衡的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 1-8.
- FU Wenqi, ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, et al. Effects of the planting structure adjustment on water budget of field system in Hetao irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 1-8.

Using Semi-distributed Hydrological Model to Improve Water and Salt Management in Hetao Irrigation District

CHANG Xiaomin^{1,2}, LIU Siyu¹, WANG Shaoli^{1,2}, GUAN Xiaoyan^{1,2*}, CHEN Haorui^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: 【Objective】 Available water for irrigation in Hetao irrigation district has been reduced consistently over the past decades. Improving its water management to alleviate soil salinity is critical to sustaining crop production in this region. The purpose of this paper is to seek optimal water-saving irrigation schemes for this region by using process-based models. 【Method】 The semi-distributed hydrological model (SahysMod) is used in our study. We consider spatial variability of numerous factors in the modelling, which include meteorology, hydrogeology, soil, irrigation and crops. The model is then combined with GIS to simulate the spatiotemporal dynamics of soil water and salt under different scenarios. Data measured from 2007 to 2012 and 2013—2016 were used to calibrate and verify the model, respectively. 【Result】 ①In a business as usual scenario, the annual drainage decreases first before gradually stabilizing, with the average annual drainage being 531 million m³; salinized lands in the middle and upper reaches of the irrigation district decrease slightly, but increase significantly in the lower reach. ②Considering water-saving in the whole irrigation district and ecological demand for water in the downstream and the Wuliangshuai lake, the total water diversion from the canal head should be reduced by 15% from the current level. This will save up to 646 million m³ of water. ③If the current irrigation amount remains unchanged, the water utilization coefficient of the canal can be improved 17.6% at the best. ④If the reduction in total water diversion from Yellow River is the same, reducing irrigation amount in the field is the best way to boost salt leaching. In this scenario, reducing irrigation amount should be the priority, followed by improving water utilization coefficient of the canal. 【Conclusion】 In addition to saving water, considering ecological demand of the downstream for water is also important in optimizing water management in Hetao Irrigation District.

Key words: SahysMod model; water and salt dynamics; spatial change; irrigation water saving; irrigation and drainage management

责任编辑: 韩洋