文章编号: 1672 - 3317 (2024) 04 - 0074 - 08

基于地下水均衡模型的河套灌区地下水补给排泄量分析

高雅文,查元源,董斌*

(武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

摘 要:【目的】多灌少排的灌溉制度导致河套灌区地下水位上升,土壤盐碱化问题突出,模拟分析地下水补给排泄 过程能够增进对河套灌区地下水变化过程的理解。【方法】建立考虑排水过程的生育期-冻融期地下水均衡模型,分 别采用 LH-OAT 算法和 ES-MDA 算法进行参数敏感性分析和参数率定,并应用在河套灌区义长灌域。【结果】地下 水均衡模型中地下水埋深对潜水蒸发极限埋深、潜水蒸发系数、灌溉水补给系数敏感。模型在河套灌区应用精度良 好,能够充分反映灌域地下水埋深和地下水排水量的变化过程。对灌域地下水补给排泄关系进行分析发现,灌域地 下水补给主要来源于灌溉水入渗,灌域地下水排泄主要去向为潜水蒸发。在 5、7、10 月,灌域地下水储量由于较大 的灌溉用水和秋浇引水量而增加;9月份潜水蒸发量对地下水消耗量较小,这导致地下水储量增加;6、8 月由于引 水的补给量减少,部分地下水储量被潜水蒸发消耗。【结论】本文建立的考虑冻融期和地下水排水过程的水量均衡模 型应用在义长灌域效果较好,灌域不同月份地下水储量变化受引水量、地下水埋深、排水量等多种因素主导。 关键词:地下水;水均衡模型;补给;排泄;河套灌区

中图分类号: P333.1 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023427

高雅文, 查元源, 董斌. 基于地下水均衡模型的河套灌区地下水补给排泄量分析[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 74-81. GAO Yawen, ZHA Yuanyuan, DONG Bin. Modelling groundwater recharge and discharge in Hetao irrigation district using water balance model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 74-81.

0引言

【研究意义】河套灌区是我国最大的灌区之一, 地处我国北方干旱半干旱地区,水资源短缺问题严重。 为了发展粮食生产,河套灌区每年平均从黄河引水 40亿m³,但是不合理的灌溉策略导致了地下水位上 升,并进一步带来了土壤盐碱化等问题^[1-2]。因此, 正确理解和分析灌区农业水文过程并指导灌区水资 源的合理利用是非常必要的^[3-4]。

【研究进展】关于河套灌区水均衡模型,目前已 有较多研究基础。一些研究通过资料获得地下水补给 系数并直接推求水均衡各项^[5-6];一些研究基于根区 水量均衡模型研究土壤盐分的源汇问题^[7-8];一些研 究利用灌区较完整的灌排体系划分均衡单元,建立半 分布式水均衡模型^[4,9-10]。杨文元等^[11]考虑河套灌区 冻融期影响,采取经验公式来模拟冻融期地下水位变 化,并建立了考虑冻融期影响的水均衡模型,成功应 用在河套灌区,但是该模型忽略了地下水排水过程。 河套灌区由于地势平坦、多灌少排导致了地下水位上

通信作者: 董斌(1969-), 男。教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论和技术、灌溉水管理和农田水环境改善与修复的研究。

E-mail: dongbin@whu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

升的问题,因此不应忽略该地区地下水排水过程。 Wen等^[9]建立了基于达西定律和谢才公式的地下水排 水模型,并应用在河套灌区相关水均衡模型中^[4,10]。

地下水文模型中进行参数敏感性分析的研究比 较广泛^[12],但其中对概念性水均衡模型进行参数敏感 性分析的较少^[13-14]。且水均衡模型大多采用局部敏感 性分析法,该方法得出的结果具有一定的片面性和偶 然性^[15]。LH-OAT(Latin-Hypercube One-factor At-a-time) 法是一种全局敏感性分析法^[16],能够综合检测各个参 数对模型模拟结果的作用。

目前,数据同化应用到地下渗流模型中进行参数 反演的报道较多^[17-18],但其大多为小尺度规则区域的 虚拟算例研究,较少应用到实际区域尺度,特别是没 有在地下水均衡模型中的应用报道。此外,前人研究 广泛采用集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)方法,如张玉雪等^[19]利用 EnKF 方法对实际 区域二维地下水流动模型进行了多参数联合反演研 究,宋雪航等^[17]将 EnKF 算法应用到潜水流动的数据 同化问题。多重数据同化的集合平滑器(Ensemble Smoother with Multiple Data Assimilation, ES-MDA) 是 由 Emerick 等^[20]基于 EnKF 和集合平滑器 (Ensemble Smoother, ES)提出的一种数据同化算

法,与 EnKF 需要同时更新参数和状态变量相比, ES-MDA 仅需要进行参数更新,可以避免 EnKF 中参

收稿日期: 2023-09-13 修回日期: 2024-02-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201204);国家自然科学基金(52279042)

作者简介:高雅文(2000-), 女。硕士研究生,主要从事土壤水地下水水资源与环境方面的研究。E-mail: gaoyawen@whu.edu.cn

数和状态不一致的问题,已经被广泛应用于油藏、地下水污染等模型参数反演等问题^[21-22]。

【切入点】地下水排水过程是地下水动态过程的 重要组分,而现有的生育期-冻融期地下水均衡模型 缺少对地下水排水过程的考虑。在模拟方法方面,目 前采用全局敏感性分析方法对水均衡模型进行分析、 采用 ES-MDA 方法对水均衡模型进行数据同化的报 道较少。【拟解决的关键问题】针对以上问题,本文 拟建立一个考虑排水过程的生育期-冻融期地下水均 衡模型,并分别采用 LH-OAT 方法和 ES-MDA 方法 对模型进行全局参数敏感性分析和参数反演,进一步 基于本模型分析河套灌区义长灌域的地下水补给排 泄过程,为灌域农业用水管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与基础数据

内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区西部,地理坐标为北纬 40°19′—41°18′,东经 106°20′—109°19′,灌 区东西长 250 km,南北宽 50 km^[23](图 1),引黄控制 面积 1.16×10⁴ km²,是黄河中上游典型的盐渍化特大型 灌区。该地处内陆干旱区,降水量少,蒸发量大,蒸 降比在 10 以上。长期的引黄灌溉,加之灌排系统配套 不完善,排水不畅等问题,造成灌区地下水埋深较浅 的现状。义长灌域位于河套灌区中下游,总面积 3 149 km²,现在灌溉面积约 1 876 km²,占河套灌区灌溉面 积的 1/3 左右。义长灌域年均引黄水量约为 13.08×10⁸ m³,年均排水量约为 0.38×10⁸ m³。研究^[24]表明,河套 灌区含水层主要是双层结构含水层,承压含水层一般 埋深>500 m,研究区主要开采浅层潜水含水层地下水, 因此,本研究工作仅考虑浅层地下含水层的地下水。





Fig.1 The study area with groundwater monitoring well distribution

河套灌区冬季气温较低,土壤在 12 月进入冻融 期,持续至次年 4 月下旬消融过程才结束,并对地下 水埋深产生明显影响^[25]。冻融期地下水与土壤水之间 发生强烈的交互作用地下水的运动过程与非冻融期 不同。冻融期持续期间土壤剖面中存在有隔水作用的 冻结层,因此冻融期地下水几乎不受水面蒸发和降水 的影响^[26]。在冻结期,冻结层由于水分发生相变,土 水势下降,冻结层与以下的土壤水之间存在较大的土 水势梯度,故地下水的水分向冻结层运移;在融解期, 融化的土壤水一部分在重力作用下回补地下水^[27]。冻 融期地下水埋深动态受冻融作用影响较为复杂,前人 多采用经验公式或数据分析等方法进行冻融期地下 水埋深研究^[28]。因此,宜有针对性地根据冻融期和非 冻融期地下水变化规律采用不同的概念模型进行建 模,以达到连续模拟河套灌区生育期地下水补排过程 的目的。

本研究基本数据来自内蒙古河套灌区管理总局, 包括实测的义长灌域 2002—2010 年以及 2013—2015 年间逐月引水量、排水量以及每 5 日灌域各地下水监 测井地下水埋深。气象方面利用了五原县逐月蒸发皿 蒸 发 量、临河国家 气象站逐日气温数据、 ERA5_LAND 逐月区域平均降水量^[29]等数据。土质方 面,基于全国 1 km 精度土壤数据库^[30]中土壤黏粒、 砂粒量数据在 GIS 平台上进行了土壤类型的划分。 1.2 地下水均衡模型

1.2.1 非冻融期地下水均衡模块

河套灌区灌溉排水等活动主要集中在非冻融期。 针对非冻融期,本文建立如下区域尺度地下水均衡模型,以推求区域地下水埋深和地下水排水量,模型的时间单位为月:

$$-\Delta h_{\sigma}AS_{v} = \left(P_{r} + IC_{r}\right) - \left(ET_{\sigma} + D_{\sigma} + GE\right), \quad (1)$$

$$P_{\rm r} = \eta_{\rm pr} P A \,, \qquad (2)$$

$$VC_{\rm r} = \alpha_{\rm i} I , \qquad (3)$$

式中: Δh_g 是地下水埋深变化值(m/月);A是研究区 域面积(m²);S_y是潜水给水度,无量纲;P_r、IC_r分 别是降雨入渗、灌溉水入渗对地下水的补给量(m³/ 月);ET_g是潜水蒸腾量(m³/月);D_g是地下水排水 量(m³/月),即地下水排入沟道水量;GE是地下水 开采量(m³/月),义长灌域地下水开采量为0.312×10⁸ m³/a^[24];P指单位面积降水率(mm/月); $\eta_{\rm pr}$ 指降水 入渗补给系数,无量纲,取值为0.10^[5,13,31];I指研究 区整体的灌溉引水量(m³/月); α_i 指灌溉水补给系数, 表示渠系渗漏与田间灌溉水的综合入渗比例。

1.2.2 地下水排水模块

地下水排水量 *D*g采用 Wen 等^[9]提出的基于达西 定律的地下水向排水沟中排水的公式:

$$D_{g} = K(h_{d} - h_{w} - h_{g}), \qquad (4)$$

$$h_{\rm w} = b D_{\rm s}^c , \qquad (5)$$

式中: K 表示排水系数, 不仅与土壤水力条件有关,

也与排水沟间距、排水沟长度、排水沟深度有关,单 位是 m²/月; h_d表示研究区等效排水沟深度; h_w表示 等效排水沟中水深; b, c 是幂律函数形式的谢才公式 的参数,表示等效排水沟中水深与排水量之间的关系。

本文以地下水埋深和排水量的实测值率定了排水 公式中的相关参数 K、h_d、b、c。图 2 对比了地下水 埋深和模拟排水量、实测排水量的相关关系,由图 2 可知,上述地下水排水模块能够拟合排水量和地下水 埋深的相关关系,可以与灌域地下水均衡模型相耦合。







1.2.3 潜水蒸发模块

潜水蒸发是指潜水蒸发是指潜水在土壤毛细管 力的作用下,向包气带土壤中输送水分,并通过土壤 蒸发和植被蒸腾进入大气的过程。本文参考《内蒙古 河套灌区灌溉排水与盐碱化防治》^[32]采用的经验公式 如下:

$$ET_{g} = E_{w}(C_{1}A_{1} + C_{2}A_{2}), \qquad (6)$$

对于黏土: $C_1=j_1h_g^{-k_1}$, (7)

对于砂壤土: $C_2=e_1-f_1 \ln h_g$, (8)

$$f_1 = \frac{e_1}{\ln(h_{\rm ex})},\tag{9}$$

式中: E_w 表示单位面积上开放水面蒸发率(mm/月), 由 20 cm 蒸发皿的蒸发量乘以系数 0.56 获得; A_1 、 A_2 分别表示土壤类型为黏土、砂壤土时的蒸发面积 (m²); C_1 、 C_2 分别表示土壤类型为黏土、砂壤土时 的地下水蒸发因子,无量纲; h_{ex} 表示潜水蒸发极限 埋深, 3.0~4.0 m^[13]; j_1 、 k_1 表示黏土的潜水蒸发相关 参数, e_1 、 f_1 表示砂壤土的潜水蒸发相关参数,由于 研究区砂壤土面积远大于黏土面积,故参考已有成果^[32] 给定 j_1 =0.054 8, k_1 =1.526 6,而对 e_1 和 h_{ex} 进行参数 率定。

1.2.4 冻融期地下水埋深模块

冻融期地下水埋深预测采用杨文元等^[11]提出的 与气温有关的经验公式进行计算:

式中:
$$H_0$$
表示冻融期第0天的地下水埋深(m); H_n 表示冻融期第n天地下水埋深(m); k_{TH} 表示地下水埋深相对滞后期气温的变化量,计算得值为-73mm/°C; m 表示地下水埋深相对气温的滞后周期,计算得义长灌域该参数取值为47d; T_{n-m} 和 T_{-m} 分别表示冻融期开始后第 $n-m$ 天和第- m 天的气温。

 $H = H_{k-1}(T - T)$

1.3 参数敏感性分析方法

本文采用 LH-OAT 法进行参数敏感性分析。 LH-OAT 法是一种全局敏感性分析方法,将拉丁超立 方采样法和单因子敏感性分析法结合起来,可以用最 少的采样数最优地覆盖采样立方。LH-OAT 法计算归 一化的参数敏感度指数计算方法如下,表 1^[16]给出了 参数敏感性的分级。

$$I_{i,j} = \frac{\Delta S_{i,j}}{S_j} \frac{G_{i,j}}{\Delta G_{i,j}}, \qquad (11)$$

$$I_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_{i,j}, \qquad (12)$$

式中: *S* 为模型输出, *G_i* 为模型中影响 *S* 的第 *i* 个参数; *j* 代表 *n* 组拉丁超立方抽样的第 *j* 组参数组合; *I_{i,j}* 代表第 *j* 组参数组合中第 *i* 个参数对输出 *S* 的敏感度 指数; *I_i*代表第 *i* 个参数对输出 *S* 的敏感度指数。

表 1 敏感性分级取值表

	Tab.1	Sensitivity classific	cation value
等级	ŧ	敢感度指数/-	敏感性
Ι		/ <i>I</i> /<0.05	不敏感
II	(0.05≪/ <i>I</i> /<0.2	一般敏感
III		$0.2 \le I < 1.0$	敏感
IV		/ <i>I</i> />1.0	极敏感

1.4 参数率定方法与模型验证指标

1.4.1 多重数据同化的集合平滑器(ES-MDA)算法 ES-MDA 是一种通过统计有限数量的样本来估 计模型参数的统计特征的迭代集合平滑器^[20]。 ES-MDA 算法主要特点是每次迭代都对观测误差协 方差矩阵乘以膨胀系数加以放大^[33],并对观测值重新 采样,充分发挥同一份观测数据的效用。ES-MDA 计 算步骤如下:

1)随机生成 N_e 个初始参数集合 \mathbf{m}_j , $j=1, 2, 3, \cdots$, N_e :

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \cdots, \mathbf{m}_j, \cdots, \mathbf{m}_{Ne}\}^{\mathrm{T}_{\circ}}$$
(13)

 选择数据同化迭代次数 N_a,以及逐次迭代的 膨胀系数 α^r, r=1, 2, 3, …, N_a,且满足:

$$\sum_{r=1}^{N_a} \frac{1}{\alpha^r} = 1$$
 (14)

3) 进行参数集合的迭代, 重复以下步骤 N_a次:

2

i) 计算第 r 次迭代中基于参数集合 \mathbf{m}_j 运行系统 模型得到的模拟值 \mathbf{d}_j^{fr} 。

$$\mathbf{d}_{\mathrm{uc},j}^{r} = \mathbf{d}_{\mathrm{obs}} + \sqrt{\alpha^{r}} \mathbf{C}_{\mathrm{d}}^{\frac{1}{2}} \mathbf{z}_{\mathrm{d}}, \qquad (15)$$

式中: **d**^r_{uc,i} 表示对于每个参数集合 j 在第 r 次迭代中

扰动后的观测值; \mathbf{d}_{obs} 表示观测真值; \mathbf{C}_{d} 表示观测误 差协方差矩阵 $\mathbf{C}_{d}=\mathbf{E}[\epsilon\epsilon^{T}]$, ϵ 代表观测误差的均方根误 差; $\mathbf{z}_{d}\sim \mathbf{N}(0, \mathbf{I}_{N_{d}})$, N_{d} 表示观测值个数。

iii)利用下式来更新参数集合:

$$\mathbf{m}_{j}^{r+1} = \mathbf{m}_{j}^{r} + \mathbf{C}_{md}^{r} \left(\mathbf{C}_{dd}^{r} + a^{r} \mathbf{C}_{d}\right)^{-1} \left(\mathbf{d}_{j}^{obs} - \mathbf{d}_{j}^{f,r}\right), \quad (16)$$

式中: \mathbf{m}_{j}^{r+1} 为第r次迭代更新得到的第j个参数集合; \mathbf{C}_{md}^{r} 代表参数向量 \mathbf{m}_{j}^{r} 和模型预测值 \mathbf{d}_{j}^{fr} 的协方差 矩阵; \mathbf{C}_{dd}^{r} 代表模型预测值 \mathbf{d}_{j}^{fr} 的自协方差矩阵。

1.4.2 ES-MDA 评价指标

ES-MDA 采用参数集合的标准差(Standard Deviation, *Std*)表示参数集合的离散程度,即迭代所得的参数值的精度^[34]。计算式为:

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_e} (x_i - \overline{x})^2}{N_e - 1}} , \qquad (17)$$

式中: x_i表示某个参数的第 i 个样本值; x 表示该参数样本集合的平均值。

1.4.3 模型验证指标

本文用决定系数(*R*²)表示观测值和模拟值之间的线性相关关系,用均方根误差(*RMSE*)评判模型误差,计算式^[35]为:

$$R^{2} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N} (O_{i} - \overline{O})(P_{i} - \overline{P})\right)^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (O_{i} - \overline{O})^{2} \sum_{i=1}^{N} (P_{i} - \overline{P})^{2}},$$
 (18)

$$RMSE = \sqrt[2]{\left(\frac{P_i - O_i\right)^2}{N}}, \qquad (19)$$

式中: O_i 和 P_i 分别表示观测值和模拟值, $i=1, 2, \cdots$,

N; **O**和**P**分别表示观测值和模拟值的平均值; N为 样本数。**R**²越接近于 1,表示观测值和模拟值之间的 线性关系越强。 2.1 模型率定

结果与分析

2.1.1 参数敏感性分析结果

基于 LH-OAT 算法分别对地下水均衡模型的参数潜水蒸发极限埋深(*h*ex)、潜水蒸发系数(*e*1)、潜水含水层给水度(*S*y)、灌溉水补给系数(*a*i)进行全局敏感性分析。由图3可知,地下水埋深对潜水蒸发极限埋深最敏感,对潜水蒸发系数敏感,这印证了潜水蒸发过程对该区地下水存在重要影响。地下水埋深 对灌溉水补给系数敏感,这与义长灌域每年较大的灌溉引水量有关。地下水埋深与潜水给水度呈负相关, 且接近于不敏感。



2.1.2 模型率定与验证结果

为了使模型能够模拟义长灌域地下水平衡状况, 本研究采用 ES-MDA 算法^[36]对地下水均衡模型进行 了参数率定及验证。需要进行率定的参数主要有潜水 蒸发极限埋深,潜水蒸发系数,潜水含水层给水度, 灌溉水补给系数。根据实测数据,将模型训练期定为 2002-2010年,分别用 2013-2015年的地下水埋深 数据和2011-2015年的地下水排水量数据进行验证。 经过试算,参数集合随机取 200 个样本、参数集合迭 代 20 次能够使集合收敛至稳定值。最终参数集合取 值及标准差如表 2 所示。从参数集合的标准差来看, 参数集合基本已经收敛。将参数率定值与现有研究结 果进行比较,确定其合理性。已有研究中河套灌域潜 水给水度大小为 0.02~0.10^[5,31], 而率定值为 0.029; 灌溉水补给系数前人研究^[11,31]取值为 0.18~0.42, 而 率定值为 0.225; 河套灌区潜水蒸发极限埋深应介于 3.5~4.0 m^[13,37], 而率定结果为 3.97 m, 因此参数率定 值都在合理范围内。

表 3 为最终模型率定及验证的效果指标。率定期 地下水埋深模拟值相对实测值的 *RMSE* 为 0.27 m, *R*² 为 0.63,验证期地下水埋深模拟值相对实测值的 *RMSE* 为 0.21 m, *R*² 为 0.60,率定期和验证期的地下

水埋深模拟结果较好。从模型地下水排水量模拟效果	0.52, 验证期的 <i>RMSE</i> 为 200×10^4 m ³ , <i>R</i> ² 为 0.88, 说
来看,率定期模拟值的 <i>RMSE</i> 为 402×10 ⁴ m ³ , <i>R</i> ² 为	明地下水排水量的模拟精度较高。
表 2 地下水均衡标	莫型参数率定结果

	Tab.2 The calibra	ation results of parameters in	i the groundwater balance	lilodel
率定结果	潜水给水度	灌溉水补给系数	潜水蒸发系数	潜水蒸发极限埋深/m
参数率定值	0.029	0.225	0.282	3.967
标准差	0.008	0.054	0.089	0.110

表3 模型率定及验证效果指标

Fab.3	Model	fitting	performa	ance indica	tors of c	alibration	and validation

模拟期	地下水埋深均方根误差/m	地下水埋深决定系数	地下水排水量均方根误差/(10 ⁴ m ³)	地下水排水量决定系数
模型率定期	0.27	0.63	402	0.52
模型验证期	0.21	0.60	200	0.88

图 4 为 2002—2015 年每月地下水埋深的模拟值 与所有监测井实测值的平均值随时间变化的对比。地 下水埋深的模拟值与实测值整体时间变化趋势吻合, 模拟值能够反映地下水埋深的年内与年际变化情况。 但是模型对地下水埋深的极大值、极小值模拟效果较 差,模拟埋深难以达到实测埋深的极大值或极小值, 这与模型时间尺度为月导致模型输入输出被平均化有 关。图 5 为 2002—2015 年地下水每月排水量模拟值与 实测灌域月排水量随时间变化的对比。由图 5 可知, 整体上地下水排水量的模拟值也能够反映实测值的时 间变化趋势。实测研究区研究时段内年均排水量为 3 803 万 m³,模拟值年均地下水排水量为 2 990 万 m³, 误差率为 21.38%,年均排水量误差率在可接受范围 内。但是模型对排水量的极大值模拟较差,这可能是 由于排水量较大时实测值误差较大,也可能是由于排 水量计算受到模拟的地下水埋深误差的影响。总体来 看,模型的率定验证结果表明模型可以刻画义长灌域 2002—2010 年的地下水埋深、地下水排水量变化过 程,为下一步地下水补给排泄项的分析预测提供基础。





Fig.5 Comparison of simulated and measured groundwater drainage amount from 2002 to 2010

2.2 灌域地下水补给排泄量分析

2.2.1 非冻融期年地下水补排量分析

灌域非冻融期年均地下水补给、排泄水量组成如 图 6 所示。灌域地下水年降水补给水深 17 mm,年灌 溉水补给水深 90 mm。灌域地下水补给主要来源于灌 溉水和降水的入渗,其中灌溉水入渗占比达到 84%。 灌域地下水年排泄水深 102 mm,其中潜水蒸发水深 83 mm,年地下水排水水深 10 mm。地下水排泄主要 去向为潜水蒸发,占灌域年排泄水量 81%。总体上, 该地区地下水动态类型为入渗-蒸发型,与前人^[5]研究 结论相同。





2.2.2 非冻融期各月地下水补排量分析

第4期

图 7 为地下水均衡模型非冻融期各月地下水补 给项与排泄项的对比。由图7可以分析得出,非冻融 期逐月地下水埋深变化动态及其主要影响项。5、7、 9、10月入渗水总补给量大于地下水消耗量,地下水 储量因此增加。其中5、7月作物生育期灌溉引水量 大、入渗补给量较多是主导因素,9月地下水埋深较 大以致潜水蒸发量较少是主要原因,10月的主要原 因则是秋浇洗盐引水量较大、地下水入渗补给量较多。 6、8月由于引水量的减少,入渗水补给量远小于潜 水蒸发量,从而导致潜水蒸发消耗了部分地下水储量。 年内主要地下水排水量集中于11月,这是由于10月 地下水净补给量大、埋深减小,在灌域排水系统作用 下排水量便大幅增加。



3 讨论

本文建立的考虑排水过程的生育期-冻融期地下 水均衡模型能够对河套灌区地下水埋深和排水量进 行预测,并为控制管理河套灌区地下水位提供参考。 本文还针对水均衡模型参数敏感性进行了分析,发现 地下水埋深对灌溉水补给系数非常敏感,潜水给水度 与地下水埋深呈负相关关系,这与薛景元^[13]研究结果 一致。本文发现地下水埋深对给水度的敏感性较小, 进一步分析发现地下水埋深和给水度间的正负相关 性与地下水储量增加、减少趋势有关^[38],即当地下水 储量增加时,地下水埋深会减小,而给水度的增加会 减少地下水埋深的减小程度,表现为给水度与地下水 埋深正相关;当地下水储量减少时,地下水埋深会增 加,而给水度的增加会减少地下水埋深的增加程度, 表现为给水度与地下水埋深负相关。不同参数组合下 模型地下水储量变化趋势具有非一致性,因此给水度 的敏感性正负具有非一致性,这导致进行全局敏感性 分析时不同参数组合下给水度平均敏感性接近于 0。

本文对义长灌域非冻融期年均地下水补给、排泄 量进行了分析,结果表明灌域年降雨入渗补给地下水 17 mm,这与前人研究结果一致^[5,13]。本文还发现灌域 年地下水潜水蒸发水深为 83 mm,占灌域年排泄水量 的 81%,与杨文元等^[11]的研究结果相近,但是小于薛 景元^[13]的计算结果。同时,本文计算所得年灌溉水补 给水深为 90 mm,也小于薛景元^[13]的计算结果。分析 其主要原因是研究区主要受灌溉入渗补给和潜水蒸发 影响,灌溉入渗补给系数与潜水蒸发系数容易出现同 增同减的异参同效现象^[31],这导致水均衡模型得出的 潜水蒸发量与灌溉水补给量同增同减,难以确定大小。

整体而言,本文建立的考虑排水过程的生育期-冻融期地下水均衡模型能较为准确地模拟义长灌域 地下水埋深和地下水排水量的变化过程,为具体分析 灌域年均和年内地下水补给排泄关系提供了基础。未 来本模型可以应用于气候变化、节水等情景下干旱地 下水浅埋灌区的地下水位及排水量动态预测;进一步 扩展盐分和氮素等模块后可以探索灌区排水中盐分 和氮素通量等问题。

4 结论

1)地下水均衡模型中地下水埋深对潜水蒸发极限埋深、潜水蒸发系数、灌溉水补给系数敏感。

2)利用地下水埋深实测数据对模型用 ES-MDA 方法进行了参数率定以及验证,结果表明模型能够充 分模拟灌域地下水埋深和地下水排水量变化过程。 3)灌域地下水补给主要来源为灌溉水入渗,占 比达到 84%。灌域地下水排泄主要去向为潜水蒸发, 占灌域年排泄水量的 81%。灌域地下水动态类型为入 渗一蒸发型。

4) 5、7、10 月灌域地下水储量由于较大的灌溉 用水量和秋浇引水量而增加;9月份潜水蒸发量对地 下水消耗量较小,导致地下水储量增加;6、8月由 于引水的补给量减少,部分地下水储量被潜水蒸发消 耗。年内地下水排水量主要集中于11月。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] HAN D M, SONG X F, CURRELL M J, et al. A survey of groundwater levels and hydrogeochemistry in irrigated fields in the Karamay Agricultural Development Area, Northwest China: Implications for soil and groundwater salinity resulting from surface water transfer for irrigation[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 217-234.
- [2] YANG H, ZHANG X H, ZEHNDER A J B. Water scarcity, pricing mechanism and institutional reform in Northern China irrigated agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2003, 61(2): 143-161.
- [3] YUE W F, LIU X Z, WANG T J, et al. Impacts of water saving on groundwater balance in a large-scale arid irrigation district, Northwest China[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 297-312.
- [4] WEN Y Q, WAN H Y, SHANG S H, et al. A monthly distributed agro-hydrological model for irrigation district in arid region with shallow groundwater table[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127 746.
- [5] 岳卫峰.内蒙河套灌区义长灌域耗水机制研究[D].武汉:武汉大学, 2004.

YUE Weifeng. Study on the mechanism of consumption in Yichang irrigation sub-district of irrigation district of Inner Mongolia along the Yellow River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.

[6] 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 Wencong. Research on agricultural hydrological process and optimal allocation of dry drainage system in a typical irrigation and drainage unit of Hetao irrigation district[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.

- [7] SUN G F, ZHU Y, YE M, et al. Development and application of long-term root zone salt balance model for predicting soil salinity in arid shallow water table area[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 486-498.
- [8] LIU Y N, ZHU Y, MAO W, et al. Development and application of a water and salt balance model for well-canal conjunctive irrigation in semiarid areas with shallow water tables[J]. Agriculture, 2022, 12(3): 399.
- [9] WEN Y Q, SHANG S H, RAHMAN K U, 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: 105 962.
- [10] WEN Y Q, WAN H Y, SHANG S H. A monthly distributed water and salt balance model in irrigated and non-irrigated lands of arid irrigation district with shallow groundwater table[J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128 811.
- [11] 杨文元,郝培静,朱焱,等.季节性冻融区井渠结合灌域地下水动态 预报[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 137-145. YANG Wenyuan, HAO Peijing, ZHU Yan, et al. Groundwater dynamics forecast under conjunctive use of groundwater and surface water in seasonal freezing and thawing area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 137-145.

- [12] 翟远征,王金生,苏小四,等.地下水数值模拟中的参数敏感性分析[J].
 人民黄河,2010,32(12):99-101.
- [13] 薛景元. 干旱地下水浅埋区基于水盐过程的多尺度农业水分生产力 模型与模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
 XUE Jingyuan. Modeling agricultural water productivity at muti-scales based on water and salt processes in arid area with shallow groundwater[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.

[14] 王璐瑶,彭培艺,郝培静,等.基于采补平衡的河套灌区井渠结合模式及节水潜力[J].中国农村水利水电,2016(8):18-24.
WANG Luyao, PENG Peiyi, HAO Peijing, et al. Well-canal conjunctive irrigation mode and potential of water-saving amount based on the balance of exploitation and supplement for Hetao irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 18-24.

- [15] 马瀚青,张琨,马春锋,等. 参数敏感性分析在遥感及生态水文模型中的研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 286-298.
 MA Hanqing, ZHANG Kun, MA Chunfeng, et al. Research progress on parameter sensitivity analysis in ecological and hydrological models of remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 286-298.
- [16] 秦萍, 王正, 孙兆军, 等. 基于 LH-OAT 方法的 VG 模型参数敏感性 分析[J]. 节水灌溉, 2019(10): 97-102.
 QIN Ping, WANG Zheng, SUN Zhaojun, et al. Sensitivity analysis of VG model parameter based on LH-OAT method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(10): 97-102.
- [17] 宋雪航,史良胜,杨金忠.基于集合卡尔曼滤波的潜水动态预测方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(3): 324-331.
 SONG Xuehang, SHI Liangsheng, YANG Jinzhong. Application of ensemble Kalman filter to phreatic water flow[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(3): 324-331.
- [18] 林琳,史良胜,宋雪航.地下水参数反演的确定性集合卡尔曼滤波 方法[J].武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 161-167, 172.
 LIN Lin, SHI Liangsheng, SONG Xuehang. A deterministic ensemble Kalman filter method for inversing hydrogeological parameters[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 161-167, 172.
- [19] 张玉雪,朱焱,杨金忠.基于集合卡尔曼滤波的灌域尺度地下水多 参数联合反演[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):66-74. ZHANG Yuxue, ZHU Yan, YANG Jinzhong. Estimating aquifer parameters in irrigation district using inverse method coupled with the ensemble Kalman filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5):66-74.
- [20] EMERICK A A, REYNOLDS A C. Ensemble smoother with multiple data assimilation[J]. Computers & Geosciences, 2013, 55: 3-15.
- [21] 周念清,张瑞城,江思珉,等. ES-MDA 算法融合 ERT 数据联合反演 地下水污染源与含水层参数[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3): 478-486.

ZHOU Nianqing, ZHANG Ruicheng, JIANG Simin, et al. Joint inversion of contaminant source and aquifer parameters by assimilating ERT data with the ES-MDA algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 478-486.

- [22] 王泽龙,刘先贵,唐海发,等.基于多次数据吸收集合平滑算法的自动油藏历史拟合研究[J]. 特种油气藏,2021,28(3):99-105.
 WANG Zelong, LIU Xiangui, TANG Haifa, et al. Study on automatic reservoir history matching based on ES-MDA algorithm[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(3): 99-105.
- [23] 阮本清,张仁铎,李会安.河套灌区水平衡机制及耗水量研究[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [24] 郭梦申. 乌梁素海流域地下水迁移转化特征及其影响因素[D]. 北京: 北京师范大学, 2022.

GUO M S. Study on temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of groundwater in Wuliangsuhai Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2022.

- [25] 毛俊,伍靖伟,刘雅文,等.盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响试验 及数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2021,40(2): 62-69. MAO Jun, WU Jingwei, LIU Yawen, et al. Effects of salt content on evaporation from seasonally frozen soil: Experimental measurement and numerical simulations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 62-69.
- [26] DAI L C, GUO X W, DU Y G, et al. The response of shallow groundwater levels to soil freeze-thaw process on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. GroundWater, 2019, 57(4): 602-611.
- [27] 杜鑫钰. 冻融作用下浅埋潜水蒸发规律的室内试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
 DU Xinyu. Indoor experimental study on evaporation law of shallow phreatic water under freeze-thaw action[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [28] 崔莉红. 饱和-非饱和冻融土壤水热盐迁移规律及数值模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020. CUI Lihong. Research on water, heat and salt transport in saturated-unsaturated soil during freezing-thawing period: Field monitoring and numerical modeling[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [29] ERA5 Monthly Aggregates-latest climate reanalysis produced by ECMWF. Copernicus Climate Change Service. Earth Engine Data Catalog[EB/OL]. [2023-09-05]. https://developers.google.com/ earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_MONTHLY.
- [30] SHANGGUAN W, DAI Y J, LIU B Y, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [31] 杨威, 毛威, 杨洋, 等. 基于 MODFLOW 的河套灌区井渠结合开采 模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 93-101.

YANG Wei, MAO Wei, YANG Yang, et al. Optimizing conjunctive use of groundwater and cannel water in Hetao irrigation district aided by MODFLOW[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 93-101.

- [32] 王伦平,陈亚新.内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M].北京: 水利电力出版社,1993.
- [33] 郑强. 地下渗流模型数据同化算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
 ZHENG Qiang. Data assimilation for subsurface flow models[D].
 Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [34] XU T, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J J, CHEN Z, et al. A comparison between ES-MDA and restart EnKF for the purpose of the simultaneous identification of a contaminant source and hydraulic conductivity[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125 681.
- [35] 邰淑彩,孙韫玉,何娟娟.应用数理统计[M].武汉:武汉大学出版 社,2005.
- [36] COLLET A. pyESMDA-Python ensemble smoother with multiple data assimilation[CP/OL]. Zenodo, 2022[2023-09-07]. https://zenodo.org/ record/7425670.
- [37] 谭畅. 基于溴示踪的盐荒地干排能力研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.

TAN Chang. Study on the capacity of dry drainage in fallow areas based on bromine tracer test[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.

[38] 韩笑笑.潮白河冲洪积扇地下水流数值模拟与参数敏感性分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
HAN Xiaoxiao. Numerical simulation of groundwater flow and sensitivity analysis of parameters in Chaobai River alluvial fan[D].
Beijing: China University of Geosciences, 2021.

Modelling groundwater recharge and discharge in Hetao irrigation district using water balance model

GAO Yawen, ZHA Yuanyuan, DONG Bin*

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: [Background and Objective] Irrigation in the Hetao irrigation district relies on water diversion from the Yellow River. However, its flat terrain coupled with suboptimal irrigation and drainage practices over the past decades has resulted in groundwater table rise, leading to significant soil salinization. This paper develops a water balance model to calculate groundwater recharge and drainage in the irrigation district. [Method] A comprehensive water balance model was established by accounting for seasonal freezing and thawing, as well as groundwater drainage. It was then applied to the Yichang area in the irrigation district. Sensitivity of the model was analyzed using the Latin Hypercube-One-At-a-Time (LH-OAT) method; parameters in the model were estimated using the ensemble square-root method of data assimilation (ES-MDA). [Result] Sensitivity analysis reveals that change in groundwater depth is sensitive to parameters including the critical depth of phreatic groundwater table below which groundwater evaporation ceases, coefficient of phreatic groundwater evaporation and coefficient of irrigation water recharge. The model accurately reproduces the variation in groundwater depth and groundwater drainage in the studied area. Groundwater recharge primarily emanates from irrigation water infiltration, while drainage is predominantly through groundwater evaporation. The analysis identifies seasonal fluctuations in groundwater storage, which is influenced by factors such as irrigation water diversion, groundwater depth and groundwater drainage rate. [Conclusion] The proposed water balance model accounts for freezing and thawing, as well as groundwater discharge. Practical application shows the model is robust for modelling groundwater dynamics in the Yichang area in the Hetao irrigation district. Monthly change in groundwater storage is influenced intractably by irrigation practices, groundwater dynamics and climatic condition.

Key words: groundwater; water balance model; recharge; discharge; Hetao irrigation district

责任编辑:赵宇龙