

基于 MODFLOW 的河套灌区地下水位模拟及生态适宜地下水埋深分析

杨小强^{1,2,3}, 茹泽宇^{1,2}, 李琼芳^{1,2,3}, 井 淼⁴, 任 黎³, 张小琳⁵, 刘艳丽^{2,6},
张 炜⁷, 苏海涛⁸, 李 浩⁹

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
3. 河海大学水文水资源学院; 4. 河海大学地球科学与工程学院; 5. 南京工程学院环境工程学院;
6. 水利部应对气候变化研究中心; 7. 内蒙古自治区水利事业发展中心; 8. 内蒙古自治区水利科学研究院;
9. 内蒙古河套灌区水利发展中心)

摘要:针对长期引黄灌溉导致河套灌区土壤盐渍化、生态退化等问题,构建了河套灌区 MODFLOW 模型模拟地下水位的时空分布,利用潜水上升最大高度和作物根系深度量化了生态适宜地下水埋深阈值,分析了不同灌溉条件下地下水埋深的生态适宜情况。结果表明:2013—2022 年河套灌区地下水位的模拟效果整体较好,多年平均相对误差小于 0.5%,年平均地下水总补给量和总排泄量分别为 11.90 亿、12.52 亿 m³,处于弱负均衡状态;2022 年灌溉条件下,除乌兰布和灌域外,大部分灌域的地下水埋深处于生态适宜范围内(1.46~2.96 m);减少 10%和 20%灌溉量情景下,作物生育期内大部分地区仍能维持生态适宜地下水埋深,而减少秋浇灌溉量会使地下水位显著下降。

关键词:MODFLOW 模型;地下水位;生态适宜地下水埋深;河套灌区

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2026)05-0081-09

Simulation of groundwater level in the Hetao Irrigation District based on MODFLOW and analysis of ecologically suitable groundwater depth//Yang Xiaoqiang^{1,2,3}, Ru Zeyu^{1,2}, Li Qiongfang^{1,2,3}, Jing Miao⁴, Ren Li³, Zhang Xiaolin⁵, Liu Yanli^{2,6}, Zhang Wei⁷, Su Haitao⁸, Li Hao⁹(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University; 5. School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology; 6. Research Center of Climate Change, MWR; 7. Inner Mongolia Water Conservancy Development Center; 8. Water Conservancy Research Institute of Inner Mongolia; 9. Water Conservancy Development Center of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia)

Abstract: In response to the problems of soil salinization and ecological degradation caused by long-term Yellow River diversion irrigation in the Hetao Irrigation District, a MODFLOW model was constructed to simulate the spatiotemporal distribution of groundwater level in the Hetao Irrigation District. The ecologically suitable groundwater depth threshold was quantified using the maximum height of groundwater rise and crop root depth, and the ecologically suitable situation of groundwater depth under different irrigation conditions was analyzed. The results showed that the simulation effect of groundwater level in Hetao Irrigation District from 2013 to 2022 was generally good, with an average relative error of less than 0.5% over the years. The annual average total groundwater supply and discharge were 1.190 billion m³ and 1.252 billion m³, respectively, in a weak negative equilibrium state. Under irrigation conditions in 2022, except for the Ulan Buh irrigation area, the groundwater depth of most irrigation areas was within the ecologically suitable range (1.46-2.96 m). Under the scenarios of reducing irrigation by 10% and 20%, most areas can still maintain ecologically suitable groundwater depth during the crop growth period, while reducing autumn irrigation will significantly lower the groundwater level.

Key words: MODFLOW model; groundwater level; ecologically suitable groundwater depth; the Hetao Irrigation District

基金项目:内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0003-02);国家自然科学基金项目(52325902)
作者简介:杨小强(1990—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:xq.yang@hhu.edu.cn
通信作者:李琼芳(1966—),女,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:qfli@hhu.edu.cn

干旱区特大型灌区是实现我国西北地区农业稳定增收的核心依托,对区域粮食安全、生态安全和经济发展起到不可替代的战略作用^[1]。河套灌区作为典型的干旱区特大型灌区,由于长期的引黄灌溉,地下水埋深普遍较浅,由此带来了一系列的生态环境风险^[2-3]。地下水水位的动态变化对于干旱区灌区农业生态健康至关重要,地下水埋深过深时,通过毛管力向上提升的地下水难以被作物根系利用;地下水埋深过浅时,除增加土壤次生盐渍化风险外,还会导致土壤表面透气性差、根系缺氧,从而影响作物生长。因此,在水资源刚性约束增强的背景下^[4-5],深入了解灌区地下水的时空分布特征与变化规律,对于大型灌区水资源精细化管理、保障农业生产以及维持生态平衡有着重要的战略意义^[6-7]。

近年来,国内对于干旱区特大型灌区,特别是引黄灌区的地下水时空演变特征开展了大量研究^[8-11],其中基于观测数据的规律分析和特征研究以及基于地下水数值模型的动态模拟研究是两个重要方向。在规律分析和特征研究方面,杨舒雅等^[8]探究了河套灌区沈乌灌域深度节水改造前后地下水的环境变化规律,发现深度节水改造后地下水埋深与矿化度均呈现显著增加趋势;李岩等^[9]基于 1981—2022 年宁夏引黄灌区地下水埋深监测数据,分析表明宁夏引黄灌区地下水埋深自 2000 年开始呈增大趋势,主要原因是农业引水量的减少。在地下水数值模拟技术方面,Groundwater Modeling System (GMS)、MODFLOW^[12-13]等数值模型在地下水位模拟与预测方面应用广泛,王艳茹等^[14]利用 MODFLOW 对黄河下游最大引黄灌区——位山灌区的地下水水位动态进行了数值模拟,模拟结果表明位山灌区模拟期内地下水系统处于负均衡状态;杨威等^[15]基于 MODFLOW 建立了河套灌区三维地下水动态模型,并根据模拟结果得到了各个灌域的最佳井渠结合比。然而,现有灌区地下水时空动态规律研究大多欠缺与高精度地下水数值模型的深度结合,而数值模拟研究普遍基于资料基础较好的单个灌域或小范围灌区展开,难以满足大型灌区精细化管理的要求。

干旱区引黄灌区长期大量引水灌溉导致区域地下水埋深普遍较浅,土壤水和地下水之间的相互作用十分活跃^[16],而农作物生长与地下水埋深的波动密切相关,因此将地下水埋深控制在适宜作物生长的范围内尤为重要^[17]。学者们已经展开了一系列研究以评估确定灌区适宜地下水水位的阈值。例如:孙贯芳等^[18]基于内蒙古河套灌区隆胜研究区 68 块灌溉农田的监测数据,使用概率分布法确定了年均适宜临界地下水埋深为 1.77 m;马小茗等^[19]将河套

灌区解放闸灌域的遥感影像数据与地下水埋深数据相结合,统计分析得出了不同农作物各生长期适宜生长的地下水埋深阈值。然而,灌区地下水适宜埋深的研究多根据小范围研究区或试验站的试验设计和长期观测数据通过统计学方法综合确定,针对灌区尺度适宜地下水埋深阈值确定方法的研究较少。

鉴于此,本文以西北干旱区典型的特大型灌区——河套灌区为研究区,利用 MODFLOW 构建三维地下水数值模型,对河套灌区地下水进行水位模拟,并确定灌区尺度生态适宜地下水埋深阈值,评估灌溉供水减少情景下生态适宜地下水埋深的时空响应规律,以期对河套灌区地下水管理与利用、水土资源优化配置提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河套灌区北起阴山山脉狼山与乌拉山南麓的冲积扇群,南抵黄河北岸平原,东界延伸至包头市郊地带,西缘与乌兰布和沙漠东沿相接,沿黄河“几”字弯北岸呈狭长带状分布,东西轴向延伸约 300 km,南北向宽度为 50~80 km,总面积约 1.10 万 km²,由乌兰布和、解放闸、永济、义长、乌拉特 5 个大型灌域组成,灌溉总面积达 7 693 km²。本文以乌梁素海退入黄河处为研究区边界(图 1),其以东区域为单独引黄配水区,未纳入本文研究范围。研究区地势南高北低、西高东低,整体表现为平缓的倾斜态势,该地势特征使灌区内的水流得以通过自流形式进行灌溉与排水。研究区年均降水量与蒸发量相差悬殊,多年平均降水量为 130~240 mm,多年平均蒸发量为 1 993~2 372 mm,年内降水主要集中在夏季 7—8 月,占全年降水量的 60%~70%。

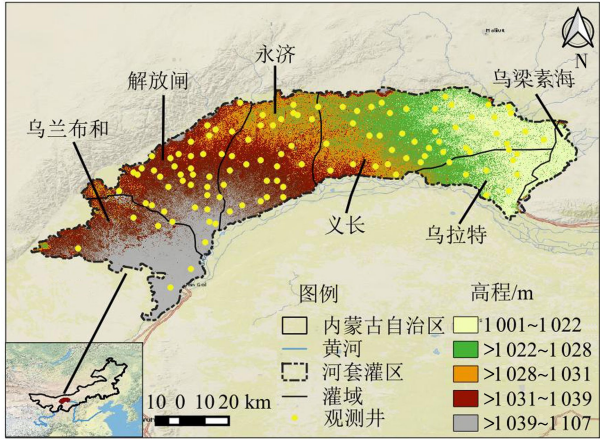


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文主要数据包括降水量、引黄灌溉水量、蒸发量、地下水位观测数据以及水文地质参数。其中,日尺度降水量数据来源于河套灌区内国家基本气象站,日尺度引黄灌溉水量和月尺度地下水位(119个观测井,图1)数据来源于河套灌区和巴彦淖尔市相关水利部门(内蒙古河套灌区水利发展中心、巴彦淖尔市水文水资源勘测中心等),时间序列均为2013—2022年。实际蒸发量数据来源于 Climate Data Store 数据平台 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) 提供的 ERA5 月平均蒸发量再分析数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。MODFLOW 模型所需的水文地质参数初值参考卢丽等^[20-21]的研究成果。

2 研究方法

2.1 模拟边界设置与含水层概化

研究区模拟范围为除灌区尾部单独引黄配水区和乌梁素海湖区外的河套灌区,总模拟面积达 108.12 万 hm^2 ^[18]。模拟边界主要分为水平边界和垂向边界。水平方向上,研究区东部为乌梁素海,是地下水的排泄边界,且交换水量受湖面水位控制,将其视为水位边界;西部的乌兰布和沙漠地带地下水流系统相对稳定,水平方向水力梯度极小,故将其简化为第二类边界条件的隔水边界^[15];北部受狼山山脉等一系列山体阻隔,仅存在微弱的侧向径流补给,处理为第二类边界条件的隔水边界;南部为黄河干流,因缺少相关动态数据,将其概化为定水头边界。模拟的垂向下边界为地下 300 m 深处,根据水文地质条件将其确定为隔水边界;垂向上边界为潜水面,

模型在此边界进行灌溉、入渗、蒸发等补排过程^[20]。本文将第四系含水岩组划分为 3 层:第一层为潜水含水层,其底部边界的埋深为 30~220 m;第二层为潜水含水层下覆的弱透水层;第三层为承压含水层底界,埋深为 300 m^[22]。这种分层设计不仅反映了地下水在不同深度的分布情况,还考虑了含水层之间的水力联系以及相互作用,各含水层概况如图 2 所示。研究区地下水流动以水平运移为主,层间受水头差异影响存在垂向渗流,地下水的水动力要素随时间和空间变化,表现为非稳定流特征,水文地质参数在空间上具有非均质性,平面上近似各向同性,垂向表现为各向异性。因此,本文将研究区地下水流系统概化为非均质各向异性的三维非稳定流。

2.2 MODFLOW 模型

本文使用新一代模拟地下水系统的数值建模软件 Visual MODFLOW Flex,其不仅兼容 Visual MODFLOW 旧版本,而且所有建模步骤可以直观地在操作界面呈现^[23],利用软件中的 MODFLOW 2005 模型进行地下水位模拟。

在综合考虑模拟精度和模型计算量的前提下,将研究区划分为 496 行、896 列的规则网格,每个网格大小为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$,活动单元格总数为 173 074,各含水层范围边界一致,活动单元格总数相同。根据数据资料情况,将模拟期确定为 2013 年 1 月至 2022 年 12 月,根据水文地质条件以及模拟要求,将应力期设置为 1 月,整个模拟期共划分为 120 个应力期,时间步长为 1 个应力期。

经过分析研究区的水文地质条件,模拟范围内的主要补给项包括降水入渗补给、灌溉入渗补给、黄河侧渗补给、山前侧向入流等,主要排泄项包括潜水

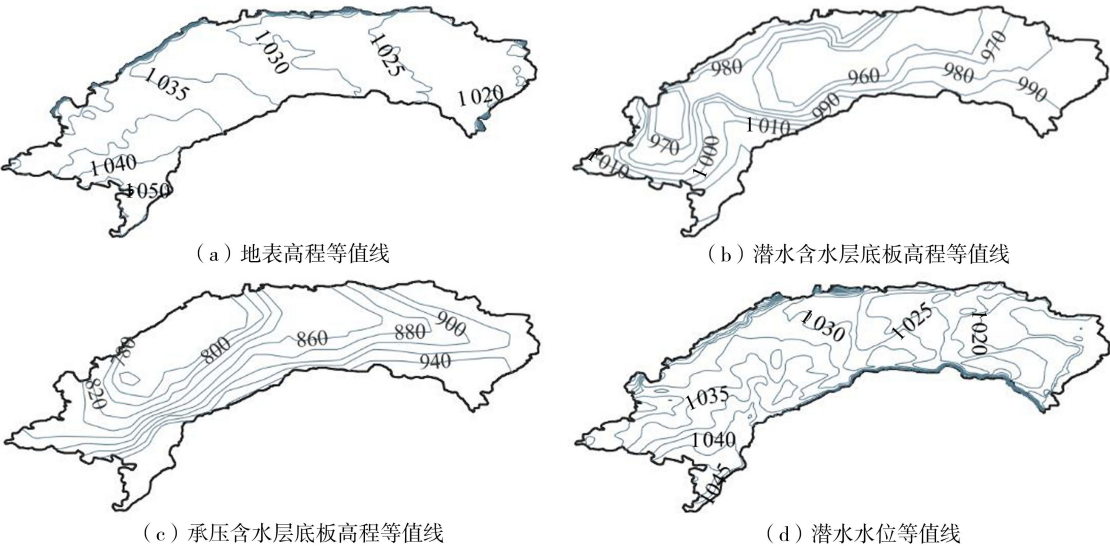


图 2 研究区含水层概况(单位:m)

Fig.2 Overview of aquifers in study area (unit: m)

蒸发和灌区排水沟系排水。龚亚兵^[21]的研究及当地水资源公报等资料显示,研究区地下水井灌用水量约占农业总用水量的 5%,但无法获取详细的井灌水量资料,因此本文在模拟时忽略这一排泄项。灌溉入渗量主要与灌区的入渗系数以及渠系水利用系数有关,计算公式见式(1),在确定引水量时,结合各引水渠的流量数据及其位置分布情况,对灌区进行了分区处理(图 3),进而确定了从总干渠直接引水的各干渠、分干引水渠的控制面积。研究区降雨较少,在模拟中将灌溉入渗补给和降雨入渗补给之和作为每个网格的补给量进行输入,降雨入渗系数根据黄莹等^[24]的研究成果取 0.1。潜水蒸发的计算公式见式(2)。

$$Q_i = \gamma \eta Q_d \quad (1)$$

$$E_g = \begin{cases} 0 & d > d_0 \\ E_0 \left(1 - \frac{d}{d_0}\right)^n & 0 \leq d \leq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_i 为灌溉入渗水量; Q_d 为引水量; γ 为灌溉入渗系数; η 为渠系水利用系数,本文采用屈忠义等^[25]的研究中各灌域的渠系水利用系数的平均值,为 0.52; E_g 为地下水蒸发强度; E_0 为水面蒸发强度; d_0 为地下水蒸发极限埋深,与包气带的岩性有关,本文取 5 m; d 为地下水埋深; n 为经验系数,本文取 1^[20]。



图 3 研究区的灌溉分区
Fig. 3 Irrigation zones of study area

2.3 生态适宜地下水埋深阈值确定

参考联合国粮农组织 (FAO) 开发的 AquaCrop 模型针对地下水在潜水面因毛管力作用而向上补给土壤水过程的描述,确定生态适宜地下水埋深阈值。潜水面以上最大毛管上升高度的计算公式见

式(3),河套灌区农业用地以砂质壤土为主, θ_{FC} 取 21%,计算得到 $h_{cr,max}$ 为 1.46 m。当地下水埋深小于 $h_{cr,max}$ 时不利于根系呼吸作用和根系生长,因此将其作为作物生态适宜地下水的埋深。另外,综合考虑灌区主要农作物玉米和葵花的根系深度一般小于 2.0 m,有效根系深度一般小于 1.0 m,根系深度范围为 0~1.5 m,由此得到作物生态适宜地下水的最大埋深为 2.96 m。综上,研究区生态适宜地下水埋深确定为 1.46~2.96 m,与杜军等^[26]的研究结果较为一致。

$$h_{cr,max} = \frac{1}{100} 10^{2+0.3(\theta_{FC}-10)/(30-10)} \quad (3)$$

式中: $h_{cr,max}$ 为潜水面以上最大毛管上升高度; θ_{FC} 为土壤田间持水率。

3 结果与分析

3.1 模型可靠性

使用试估-校正法^[27]进行 MODFLOW 模型参数识别,识别期为 2013 年 1—12 月。先给定参数的初始值,将基于参数初始值的模拟水位与观测井实测水位进行拟合,根据拟合结果调整参数,使得模拟水位接近实测值,从而得到潜水含水层、承压含水层的水平渗透系数 (K_x) 和给水度 (S_y) 的空间分布,如图 4 所示。垂向渗透系数 (K_z) 与水平渗透系数 (K_x) 的比值为 0.001。贮水系数的空间差异较小,因此各含水层分别统一取值,潜水含水层取 0.0003,承压含水层取 0.00001。

为评价 MODFLOW 模型的模拟效果,选取在模拟期内有较多观测数据且分布均匀的观测井,计算这些观测井模拟结果的均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、皮尔逊相关系数 (r) 等指标,并采用最大-最小标准化方法对指标进行归一化处理,根据各指标的重要性分配权重,进而计算各观测井的模拟效果评分,如图 5 所示。由图 5 可见,MODFLOW 模型的模拟效果总体较好,多年平均相对误差均小于 0.5%,各站点平均相关系数达到 0.85,且约 75%的观测井均方根误差小于 2.0。但在模型边界区域、解放闸灌域中部和南部及永济灌

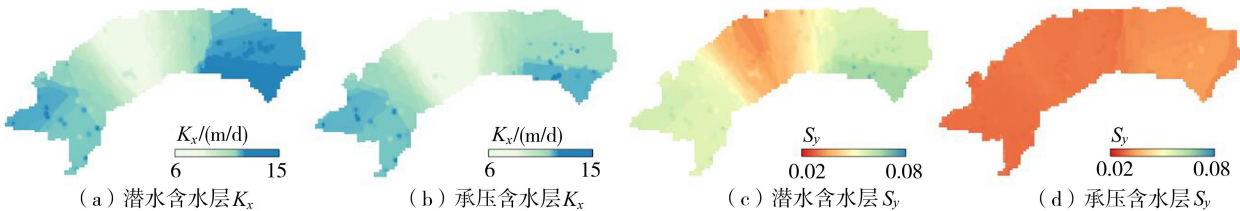


图 4 MODFLOW 模型参数空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of parameters for MODFLOW model

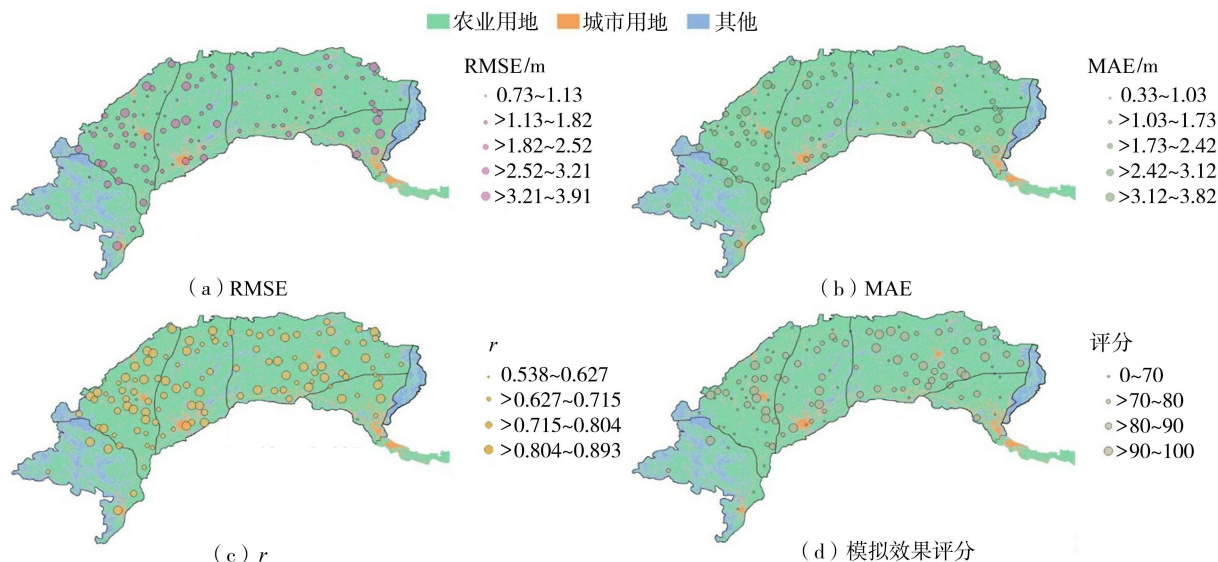


图5 模拟效果评价指标的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of groundwater simulation performance metrics

域南部存在部分误差相对较大的观测井,其中模型边界区域的误差是构建模型时对边界的简化造成的;解放闸灌域和永济灌域的部分地区采用井渠双灌的灌溉方式^[28],由于缺乏具体的井灌抽水井位置与抽水量资料,无法考虑抽水井抽水以及井灌水量回补对地下水的影响,造成误差较大。参考龚亚兵^[21]的研究成果及水资源实地调研情况,研究区整体地下水井灌水量占农业总用水量的比例较小(5%以内),且观测井的选址尽量避开受人为抽水影响的区域,虽然解放闸灌域和永济灌域部分观测井存在一定误差,但整体来说,人为抽取地下水对本文地下水位模拟影响不大。此外,乌兰布和灌域内由于沙漠面积较大,属于温带沙漠性气候,气候条件及水文地质条件与其他灌域存在较大差别,部分观测井模拟结果与实测值存在较大差异。

选取各灌域中典型的农业用地观测井,分析其月尺度地下水位模拟值与实测值的对比情况,结果如图6所示。由图6可见,地下水位模拟值在整体趋势和局部波动等方面均较好地反映了实测值的特征,特别是能够很好地反映不同观测井之间的显著差异。同时,模拟值的年内动态特征与实测值吻合较好,可见MODFLOW模型准确地反映了河套灌区在春灌前(4月之前)和生长期灌水(5—9月)以及秋浇(10—11月)期间地下水位的变化趋势,即年内地下水位下降—上升—下降—上升的周期性波动^[29]。在空间差异性方面,地下水位模拟值能反映不同地区之间的差异,例如位于乌兰布和灌域的40565040站点地下水位常年处于1035 m以上,而地势较低的乌拉特灌域的40566740站点地下水位则处于1025 m以下,符合灌区的水文地质条件空间

分布特征。但同时,在永济灌域,地下水位模拟值普遍低于实测值,这主要是由于该灌域存在井灌方式^[28],其井渠结合灌溉面积为83.8万hm²,占灌域总灌溉面积的72.2%^[30],而模型中未考虑井灌排水排泄项和入渗补给项。综上所述,本文构建的MODFLOW模型适用于针对地下水位时空变化趋势的模拟,仅在模拟地下水位的峰值和短期微小波动方面存在一定不足,可应用于后续研究。

3.2 水均衡分析

基于2013—2022年研究区地下水位模拟结果进行水均衡分析,结果如图7所示。由图7可见,2013—2022年研究区平均地下水总补给量为11.90亿m³,平均总排泄量为12.52亿m³,补排差为-0.62亿m³,地下水总体处于弱负均衡状态。研究区地下水补给量大部分来自入渗补给,占总补给量的90%以上,小部分来自研究区南部黄河和东部乌梁素海的侧向流入补给,地下水排泄大部分为潜水蒸发,排水沟排泄受灌区地势平坦、当地排水沟衬砌率较高等因素限制,排泄量较少。总体来看,各主要补给项与排泄项在研究期内量级相对稳定,但年际存在一定波动,且排泄量略大于补给量。需要指出的是,研究区地下水以潜水系统为主,且负均衡变化幅度相对较小,地下水系统主要通过年内水位波动叠加微弱的多年净变化来实现水量调节,因此观测井水位以季节性波动为主,多年尺度下降趋势并不显著。

3.3 不同情景下的生态适宜地下水埋深

为探究河套灌区引黄灌溉的节水潜力,选取2022年为基准年,设计灌溉量分别减少10%和20%的情景,模拟河套灌区重要灌溉时间(3月、6月、9月、11月)的地下水位空间分布,结果如图8所示。

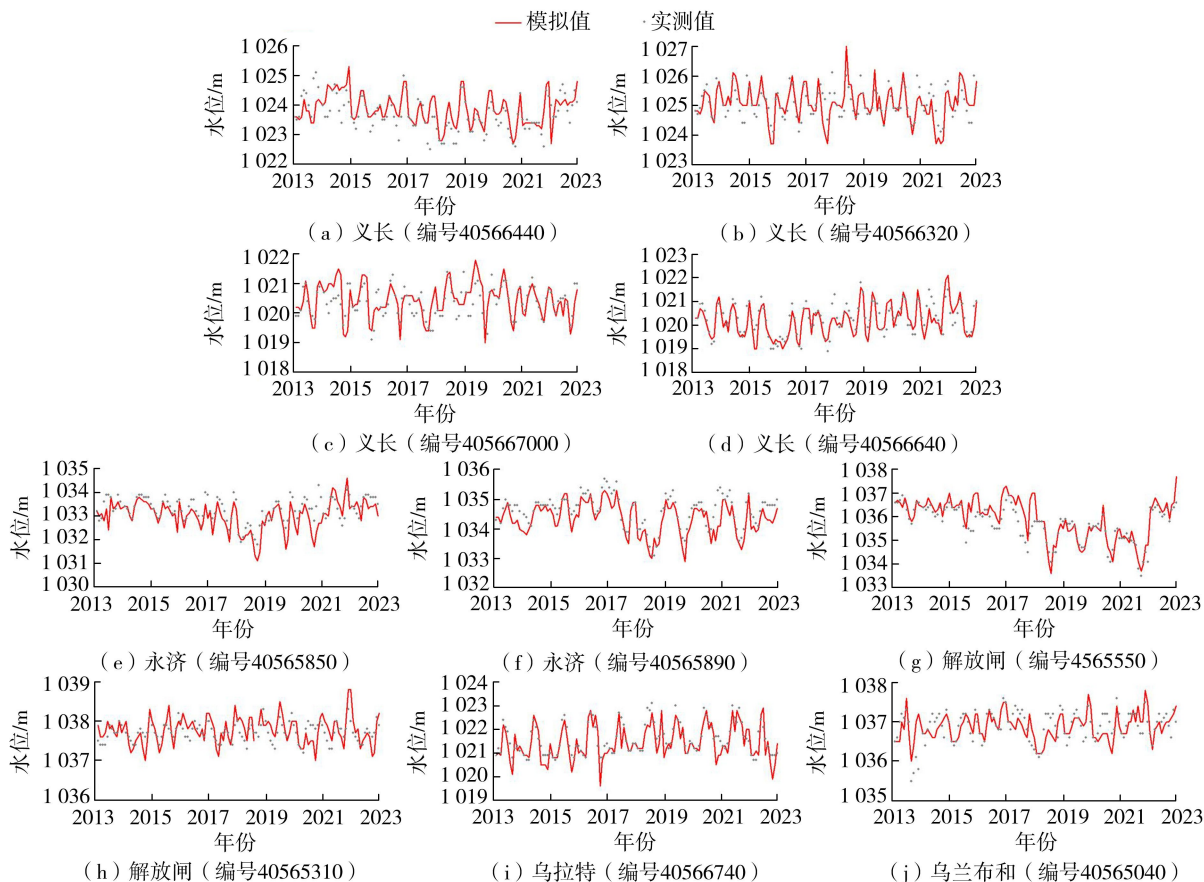


图 6 各灌域典型农业用地观测井的月尺度地下水位模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparisons between simulated and observed groundwater level at typical groundwater wells in agricultural land of each irrigation area

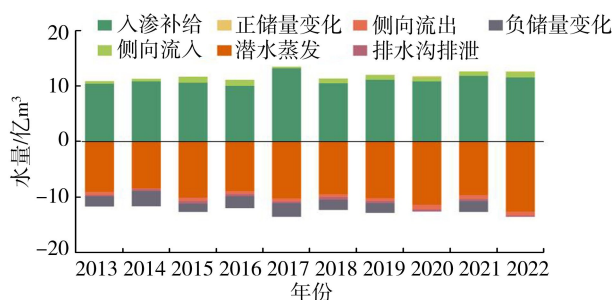


图 7 2013—2022 年研究区地下水的水均衡分析结果

Fig. 7 Results of groundwater balance analysis in study area from 2013 to 2022

结合研究区的生态适宜地下水埋深 (1.46 ~ 2.96 m), 分析基准年与减少 10% 和 20% 灌溉量情景下研究区地下水埋深的生态适宜情况空间分布, 结果如图 9 所示 (研究区边界因一系列简化导致模拟值误差较大, 作为异常值处理)。

由图 8、图 9 可见, 对于基准年, 研究区内除西部乌兰布和沙漠外, 主要农业用地区在作物生长期内的地下水埋深大多处于生态适宜范围内, 尤其是解放闸灌域和永济灌域大部分区域地下水埋深表现良好, 而义长灌域内丰济干渠与通济干渠控制区域的地下水埋深长期偏大, 主要原因是该区域引水量

相对较少, 其年有效灌溉深度折算约为 0.245 m, 远低于杨家河分区的 3.45 m。从年内动态来看, 3 月研究区内局部受水条件较好的区域 (如靠近总干渠首的解放闸灌域和永济灌域北部) 地下水埋深上升至生态适宜地下水埋深上限以上; 4—6 月研究区灌溉量达 19.4 亿 m^3 , 占全年总灌溉量的 41%, 但由于此阶段气温急剧上升, 潜水蒸发量变大, 研究区内局部地区 (如解放闸灌域北部和永济灌域西部) 地下水埋深仍会增加; 7—9 月研究区灌溉量仅占全年的 21%, 地下水埋深达到年内峰值; 9 月之后, 作物已成熟或完成收割, 因此地下水埋深对作物生长基本无影响; 10 月下旬秋浇逐渐开展, 且主要采取大水漫灌的方式进行, 仅 10 月下旬至 11 月底灌溉量就达到 13.5 亿 m^3 , 占全年总灌水量约 30%, 因此研究区地下水在 11 月普遍得到回补, 地下水埋深显著减小。

在减少 10% 灌溉量情景下, 地下水位整体空间分布和季节变化与基准年相似, 但值得关注的是, 在作物生长期初期 (6 月), 模拟地下水位反而比基准年略高, 且研究区尾部的通济干渠分区内, 地下水位升高至 3.0 m 左右, 更适宜作物水分利用。另外, 该情景下, 潜水蒸发量仅为基准年的 66.4%, 因此

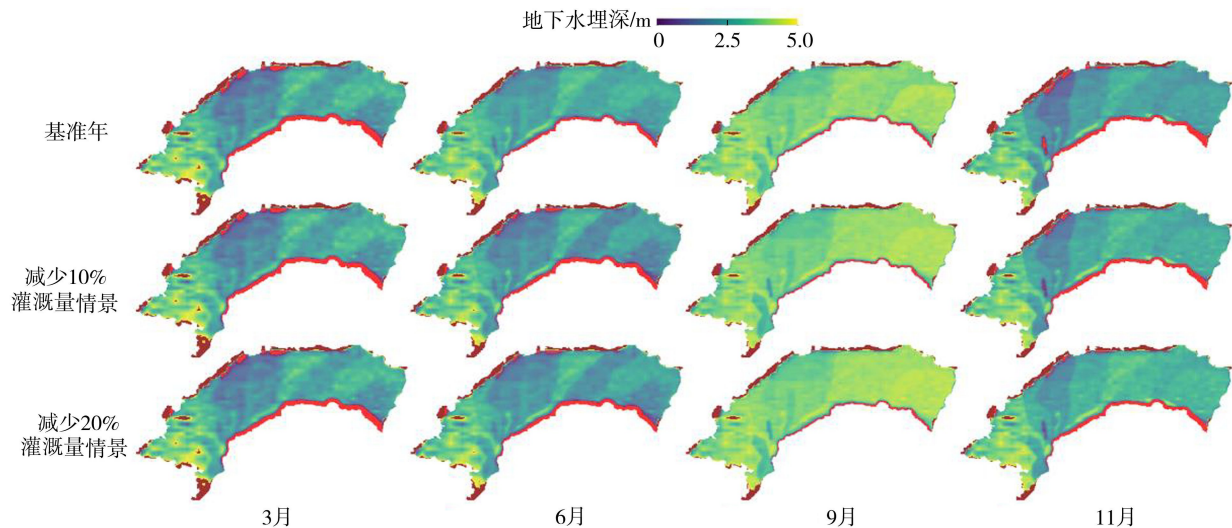


图 8 基准年与减少 10%和 20%灌溉量情景下研究区模拟地下水位空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of simulated groundwater level in study area at base year and scenarios of 10% and 20% irrigation reduction

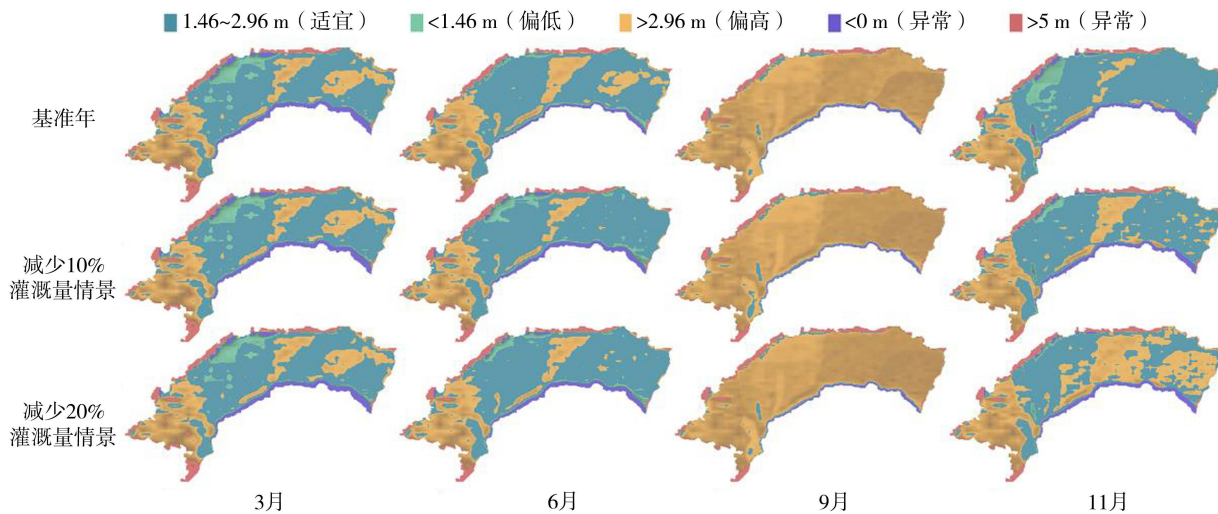


图 9 基准年与减少 10%和 20%灌溉量情景下研究区地下水埋深的生态适宜情况空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of ecologically suitable groundwater level situation in study area at base year and scenarios of 10% and 20% irrigation reduction

减少 10%灌溉量后,在基本维持作物耗水的同时大大地降低了潜水蒸发耗水量。在减少 20%灌溉量的情景下,6 月的地下水位也因相同原因呈一定程度的升高。从生态适宜角度分析,解放闸灌域、永济灌域大部分区域与义长灌域东部在减少 10%灌溉量情景下地下水埋深的响应较弱,仍处于适宜范围内,但乌兰布和灌域与义长灌域西部地下水埋深则均超出生态适宜范围。然而,值得注意的是,在年末秋浇时,减少 10%和 20%灌溉量两种情景下,研究区地下水位均会有不同程度的下降,尤其是义长灌域与乌拉特灌域,地下水位下降明显,大部分地区地下水埋深大于 2.96 m,这将不利于压盐保墒以及来年开春播种。因此,本文建议在作物生育期(3 月、6 月)可适当减少灌溉以达到节水不减效的目的,在

年末秋浇时(11 月)应慎重考虑灌溉量的分配,以防止地下水位下降趋势加剧。

4 结 论

a. 对河套灌区地质结构进行了概化,确定了 MODFLOW 模型的模拟范围和边界条件,构建了河套灌区地下水位数值模拟模型,模拟结果的评价指标分析表明模拟值与实测值拟合较好,但在模拟地下水位的峰值和短期微小波动方面存在一定不足。

b. 2013—2022 年研究区平均地下水总补给量为 11.90 亿 m^3 ,平均总排泄量为 12.52 亿 m^3 ,补排差为 -0.62 亿 m^3 ,整体处于弱负均衡的状态。研究区地下水的主要补给项和排泄项为入渗补给和潜水蒸发,占比均达到 90% 以上,各补排项呈现较为稳

定的波动。

c. 以 2022 年为基准年,研究区地下水位整体处于生态适宜埋深范围内,特别是解放闸灌域和永济灌域。减少 10%灌溉量仍能保证研究区内大部分地区作物生育期的地下水埋深处于生态适宜范围内,但秋浇灌溉量减少将导致地下水埋深显著下降。

参考文献:

[1] 张彦,李平,梁志杰,等.灌区水生态环境风险评估研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(5):159-168. (Zhang Yan, Li Ping, Liang Zhijie, et al. Research progress on risk assessment of water ecological environment in irrigation districts[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 159-168. (in Chinese))

[2] 赵勇,董义阳,翟家齐,等.考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护,2024,40(3):78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 78-89. (in Chinese))

[3] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等.“四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护,2023,39(4):111-117. (Wang Ruoyu, Zhao Zhixuan, Huang Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 111-117. (in Chinese))

[4] 景晓栋,田贵良.黄河流域最严格水资源保护利用制度的内涵解析、核心构成及实施路径[J]. 水资源保护,2025,41(2):58-64. (Jing Xiaodong, Tian Guiliang. Connotation analysis, core composition and implementation pathways of strictest water resources protection and utilization system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 58-64. (in Chinese))

[5] 褚俊英,李孟泽,周祖昊,等.水资源保护利用“四水四定”的创新管理模式[J]. 水资源保护,2024,40(2):23-27. (Chu Junying, Li Mengze, Zhou Zuhao, et al. Innovative management pattern of “four water-based principles” in water resources protection and utilization [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 23-27. (in Chinese))

[6] 李彬,史海滨,张建国,等.节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报,2014,30(21):99-110. (Li Bin, Shi Haibin, Zhang Jianguo, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (21): 99-110. (in Chinese))

[7] 王国庆,张建云.环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护,2024,40(2):1-8. (Wang Guoqing, Zhang Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))

[8] 杨舒雅,史海滨,苗庆丰,等.沈乌灌域深度节水改造前后地下水环境时空变化规律[J]. 水土保持学报,2023,37(6):170-179. (Yang Shuya, Shi Haibin, Miao Qingfeng, et al. Temporal and spatial changes of groundwater environment before and after deep water-saving renovation in Shenwu Irrigated District [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 170-179. (in Chinese))

[9] 李岩,侯峥,陈玉春.宁夏引黄灌区农业灌溉对区域地下水的影响浅析[J]. 地下水,2025,47(5):57-59. (Li Yan, Hou Zheng, Chen Yuchun. Preliminary analysis of the impact of agricultural irrigation in the Yellow River Irrigation District of Ningxia on regional groundwater [J]. Ground Water, 2025, 47(5): 57-59. (in Chinese))

[10] 张越,赵勇,薛泽宇,等.河套灌区地下水时空变化趋势成因分析[J]. 人民黄河,2016,38(11):44-49. (Zhang Yue, Zhao Yong, Xue Zeyu, et al. Cause analysis of temporal and spatial variation of groundwater level in Hetao Irrigation Area [J]. Yellow River, 2016, 38(11): 44-49. (in Chinese))

[11] 张文鸽,侯胜玲,殷会娟.内蒙古河套灌区地下水埋深时空变化及其驱动因素[J]. 节水灌溉,2020(7):36-40. (Zhang Wen' ge, Hou Shengling, Yin Huijuan. Spatial and temporal variation of groundwater depth and its driving factors in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. Water Saving Irrigation, 2020(7): 36-40. (in Chinese))

[12] 李凡,李家科,马越,等.地下水数值模拟研究与应用进展[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):99-104. (Li Fan, Li Jiake, Ma Yue, et al. The research and application progress of numerical simulation on groundwater [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 99-104. (in Chinese))

[13] 周雪婷,白雁翎,刘浏,等.变化环境下毛乌素沙地水循环分布式模拟与演变规律研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2025,61(4):496-505. (Zhou Xueting, Bai Yanling, Liu Liu, et al. Distributed simulation and evolution characteristics of water cycle in the Mu Us Sandy Land under changing environment [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025, 61(4): 496-505. (in Chinese))

[14] 王艳茹,徐征和,王通.基于 MODFLOW 的地下水动态变化特征分析:以位山灌区为例[J]. 中国农村水利水电,2018(8):60-66. (Wang Yanru, Xu Zhenghe, Wang Tong. Research on the groundwater numerical simulation of

- Weishan Irrigation area based on MODFLOW [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018 (8): 60-66. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 朱红艳. 干旱地域地下水浅埋区土壤水分变化规律研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [17] 周华,崔广柏,汪秀琴. 宁夏河套灌区节水目标与发展潜力[J]. 水资源保护,2005,21(6):88-89. (Zhou Hua, Cui Guangbo, Wang Xiuqin. Water saving objective and development potential of Yellow River irrigated districts in Ningxia[J]. Water Resources Protection, 2005, 21 (6): 88-89. (in Chinese))
- [18] 孙贵芳,翟明飞,王春语,等. 河套灌区根系层-深层土壤盐分动态及适宜控盐埋深[J]. 农业工程学报,2024, 40(21): 91-100. (Sun Guanfang, Zhai Mingfei, Wang Chunyu, et al. Root zone and deep soil salinity dynamics and suitable groundwater depth for salt control in the Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (21): 91-100. (in Chinese))
- [19] 马小茗,李瑞平,闫志远,等. 基于植被指数研究适宜河套灌区作物生长的地下水范围及阈值[J]. 灌溉排水学报,2022,41(11): 6-13. (Ma Xiaoming, Li Ruiping, Yan Zhiyuan, et al. Suitable groundwater depths for crop growth in Hetao Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(11):6-13. (in Chinese))
- [20] 卢丽. 内蒙古后套平原地下水数值模型研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2011.
- [21] 龚亚兵. 河套盆地地下水数值模拟及盐碱化水位控制研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [22] 王璐瑶. 河套灌区地下水开发利用的渠井结合比研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.
- [23] Pinder G F, Gray W G. Finite element simulation in surface and subsurface hydrology [M]. New York: Academic Press,1977.
- [24] 黄莹,胡铁松,范筱林. 河套灌区永济灌域地下水数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2010(2):79-83. (Huang Ying, Hu Tiesong, Fan Xiaolin. Numerical simulation of groundwater in Yongji Irrigation Area in Hetao Irrigation District [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010 (2):79-83. (in Chinese))
- [25] 屈忠义,杨晓,黄永江,等. 基于 Horton 分形的河套灌区渠系水利用效率分析[J]. 农业工程学报,2015, 31 (13): 120-127. (Qu Zhongyi, Yang Xiao, Huang Yongjiang, et al. Analysis of efficiency of water utilization in canal-system in Hetao irrigation district based on Horton fractal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (13): 120-127. (in Chinese))
- [26] 杜军,杨培岭,李云开,等. 河套灌区年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. (Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, 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. (in Chinese))
- [27] 李全友,任印国,程忠良. 地下水数值模拟模型识别和验证方法与标准[J]. 南水北调与水利科技,2012, 10 (A2): 30-31. (Li Quanyou, Ren Yinguo, Cheng Zhongliang. Identifying and verifying method & standard of groundwater numerical model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10 (A2):30-31. (in Chinese))
- [28] 余乐时. 河套灌区井渠结合地下水数值模拟及水资源预测分析[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [29] 苏阅文,冯绍元,王娟,等. 内蒙古河套灌区地下水位埋深分布规律及其影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2017(7): 33-37. (Su Yuewen, Feng Shaoyuan, Wang Juan, et al. An analysis of distribution regularities and the influencing factors of groundwater level in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. China Rural Water and Hydropower,2017(7):33-37. (in Chinese))
- [30] 王丽丽,丁雪华,韩天凯,等. 井渠轮灌条件下永济灌域地下水环境的变化研究[J]. 灌溉排水学报,2023, 42 (10): 91-97. (Wang Lili, Ding Xuehua, Han Tiankai, et al. Assessing groundwater environment changes in the Yongji Irrigation District under rotational well-canal irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2023, 42 (10):91-97. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 11 - 18 编辑:王芳)