

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.002

宁夏引黄灌区地下水三维非均质模拟与预测

郭政^{1,2}, 丁朋朋^{1,2}, 万愉快^{1,2}, 丁一民^{1,2}, 刘学军³, 朱磊^{1,2*}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏水利水电科学研究院, 宁夏银川 750021)

摘要:为分析宁夏引黄灌区地下水位动态变化特征,基于水文地质与工程地质勘察资料,对研究区地质结构的非均质性进行精确刻画,建立地下水非均质三维非稳定流数值模型,采用数值模拟方法对引黄灌区地下水位动态进行预测研究。结果表明:构建的三维非均质地下水流模型能够准确反映引黄灌区地下水位动态变化过程;未来灌区地下水位将持续上升,需采取相应治理措施以确保灌区生活和生产安全;豹子滩村庄区域土层透水能力差,为研究区受地下水危害较严重的区域,水位埋深为0.3~0.8 m。针对灌区现存地下水位问题,提出了多种治理方案,高效节水方案水位下降最为显著,沟道截流方案次之,平均水位埋深下降速率分别为0.35,0.18 m/a。综合考虑治理效果和现实可行性,沟道截流方案为最佳方案,能够有效解决灌区现存地下水位危害问题。

关键词:地下水;宁夏引黄灌区;数值模拟;非均质性;治理方案

中图分类号:P641.2 **文献标志码:**A

宁夏红寺堡引黄灌区是20世纪90年代建设的重大灌溉工程,在推动移民脱贫致富方面起到了决定性作用。然而,随着近年来灌区灌溉面积持续扩大、当地种植作物需水定额逐年增加,以及大面积采用地面漫灌导致灌区地下水位上升、局部地区土壤盐渍化、房屋开裂等一系列生态环境安全问题^[1-4],系统获悉该区域地下水时空变化特征及其演变规律对解决灌区地下水危害问题具有重大意义。

自20世纪60年代以来,数值模拟已成为水文地质领域的核心研究方法之一^[5-7],广泛应用于地下水系统的定量分析与动态预测^[8-16]。例如,贺向丽等^[9]基于FEFLOW软件构建红崖山灌区潜水三维数值模型以模拟预测地下水位动态变化;Okofu等^[12]利用GMS软件建立了加纳Tamne河流域三维地下水模型以评估含水层补给管理的可行性。然而,地下水模拟预测结果受参数不确定性影响较大,尤其是模型参数的空间变异性会显著影响预测精度,因此通常借助空间插值或随机抽样方法表征参数分布。胡伏生等^[13]基于变异函数与条件模拟分

析渗透系数不确定性,估算内蒙古霍林郭勒市含水层的可开采量和水位变化情况。Ghosh等^[14]对比了自然邻域法、样条函数法、克里金插值法等常见的空间插值方法预测渗透系数空间分布的准确性。Singh等^[15]提出基于遗传算法和支持向量机的组合模型(GA-SVM),对渗透系数空间分布进行了精确描述。顾文龙等^[16]采用蒙特卡罗方法定量评估了源汇项与渗透系数不确定性的综合影响。地下水数值模型可用于定量分析研究区域地下水动态变化,但传统的地下水流模型受限于地质结构的复杂性以及抽水试验得到的区域水文地质参数不完备等,通常对参数进行等效均质概化并实施参数分区计算,这使模拟结果产生一定的不确定性^[17-19]。水文地质参数的空间非均质性导致地下水模拟难以真实刻画实际的地下水运动状态^[20],是影响地下水流动及溶质运移过程的决定性因素^[21-23]。因此,在具备较为详尽水文地质资料的研究区,精确刻画含水介质非均质性,即确定关键水文地质参数的空间非均质分布,是提升模拟可信度与准确解析研究区地下水动

收稿日期:2024-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52269015;51879134)

作者简介:郭政(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究(gz06324@163.com)。

*通信作者:朱磊(1980—),男,教授,主要从事土壤水分运动研究(nxuzhulei@163.com)。

引用格式:郭政,丁朋朋,万愉快,等.宁夏引黄灌区地下水三维非均质模拟与预测[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):9-18.

态演化规律的关键。

本文以宁夏红寺堡引黄灌区为研究对象,聚焦含水介质渗透系数非均质性对地下水动态变化的影响,基于区域水文地质资料构建能够精确刻画渗透系数空间非均质性的三维地质模型;结合地下水开发利用现状与水位监测数据,建立依托非均质三维地质模型的宁夏引黄灌区三维非稳定流地下水数值模型,进一步设计多种治理方案并开展模拟预测分析,以评估不同措施的治理效果。该研究可为引黄灌区灌溉制度优化、盐碱地治理提供技术支撑。

1 研究区概况

宁夏红寺堡引黄灌区位于宁夏中部干旱带大罗山脚下,地理坐标为东经 $105^{\circ}45'$ — $106^{\circ}30'$,北纬 $37^{\circ}10'$ — $37^{\circ}29'$,面积约为 15 km^2 ,如图 1 所示。研究区位于罗山北侧的洪积扇下缘,地势呈东南高西北低,地面高程为 $1\ 202\sim 1\ 313\text{ m}$,地面坡降为 $0.8\%\sim 1.18\%$,属温带大陆性气候,干旱少雨、蒸发强烈,平均气温为 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量和蒸发量分别为 251.3 mm 和 $1\ 316.6\text{ mm}$ 。

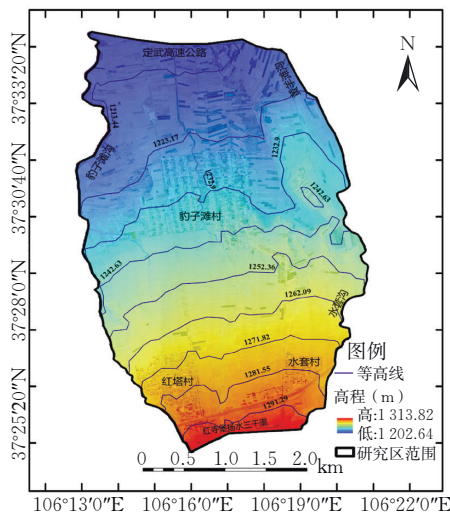


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

研究区地下水补给主要来源于侧向径流补给、渠系灌溉入渗补给和降水垂向补给,其中垂向补给主要为田间灌溉入渗和大气降水补给。研究区地下水没有开采使用,属自然赋存状态;地下水径流以侧向径流为主,由南向北运移;地下水排泄主要以地下径流的形式沿西北方向排出区外。研究区西部和东部边界为人工排水沟,北部定武高速附近为自然沟道。研究区地层结构复杂,地下水含水介质主要为细砂和粉质黏土,地层不同部分存在不连续、厚度不一的弱透水黏土层,处于洪积扇的中下部,上部地下

径流向此汇集,导致地下径流水位抬高;由于当地地下水渗透性较差,排水不畅,地下水位持续升高,最终危及居民实际生活。引黄灌区未建成之前,灌区属荒漠草原地貌,地下水埋深为 $8\sim 12\text{ m}$,研究区位于红寺堡扬水三千渠灌溉范围,灌溉面积 $1\ 087.93\text{ hm}^2$,配水定额为 $360\text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{次})$ 。

2 三维水文地质模型构建

2.1 研究区地层概况

为了掌握研究区水文地质情况,在研究区内布设了 58 个水文地质钻孔和 15 眼地下水位监测孔。由于研究区地下水上升速率最快、土壤盐渍化程度最严重的区域位于豹子滩村组,亟须对该区域进行详细的地质调查。因此,在豹子滩村组附近布设了约 80% 的水文地质钻孔,其余钻孔均匀布设于研究区中,起到控制点的作用,钻孔的深度均为 15 m ,如图 2 所示。根据钻孔数据进行三维可视化分析,研究区潜水含水介质主要为细砂、粉质黏土、素填土和细角砾土。

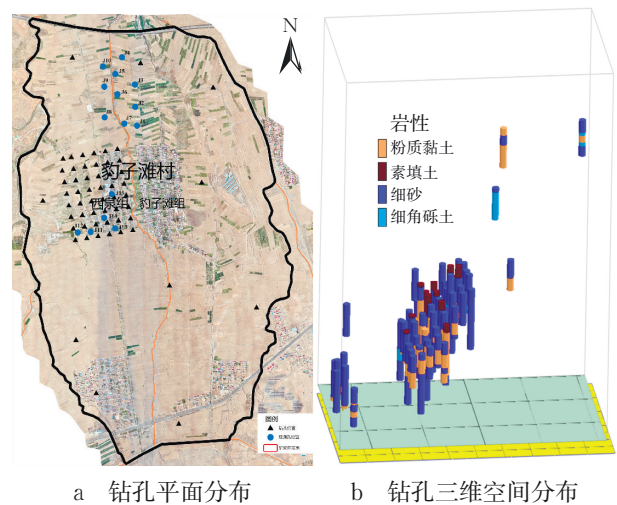


图 2 研究区钻孔分布图

Fig.2 Distribution map of boreholes in the study area

2.2 模型构建

地下含水层的非均质性通常难以刻画,对地下水流系统影响显著,限制了人们对地下水动态演化规律的认识^[24-27]。水文地质参数是量化地下水模型的基础和关键,包括渗透系数、给水度、贮水率等,其中渗透系数最为重要。本文基于详细的水文地质资料建立三维地质模型,表征研究区含水层渗透系数的空间分布。将三维空间上的钻孔信息利用 RockWorks 软件插值得到携带渗透系数信息的三维模型,如图 3a 所示;利用 Tecplot 软件将携带渗透系数信息的三维模型与 Modflow 模块划分好的

模型网格(图 3b)进行耦合^[28-29]表征含水层渗透系数三维空间分布(图 4)。图 3 中所列岩性的渗透系数经验值见表 1。利用 R 语言编写代码,将表征渗透系数空间分布的 dat 文件转换为 Modflow 模块中表征水文地质参数的 BCF 文件,用于后续预测不同模拟方案下地下水动态演化过程。

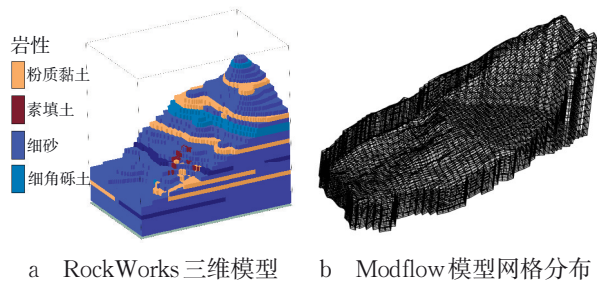


图 3 三维地质模型建立

Fig.3 Construction of the three-dimensional geological model

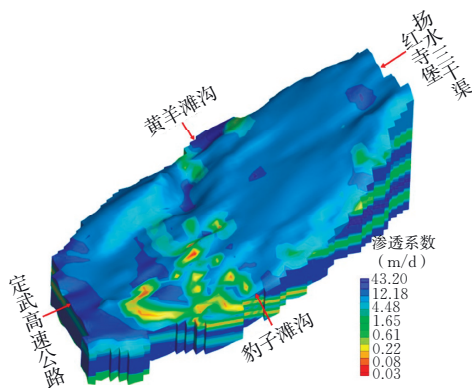


图 4 研究区渗透系数空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of permeability coefficients in the study area

表 1 岩性渗透系数经验参考值

Tab. 1 Empirical reference values for lithological permeability coefficients

岩性分类	垂直渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	给水度
粉质黏土	0.086 4~1.728	0.05
素填土	0.086 4~0.864	0.10
细砂	0.017 28~17.28	0.20
细角砾土	8.64~86.4	0.35

2.3 边界条件界定

研究区边界条件主要为水头边界和流量边界两类。南部边界红寺堡扬水三干渠为侧向流入边界,北部边界定武高速公路段为侧向流出边界,均作为流量边界;西部和东部边界为排水沟,作为水头边界,如图 4 所示。垂向上接受大气降水补给和灌溉水入渗补给,排泄项主要为蒸发。

2.4 地下水流数学模型

本次模拟渗流运动要素随着时间和空间变化,将研究区概化为非均质、各向同性、三维非稳定地下水流系统,采用模块化三维有限差分网格进行模拟计算。在不考虑水的密度变化的条件下,孔隙介质中地下水在三维空间的流动可以用以下偏微分方程来表示^[30-33]。即

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 为 x, y, z 方向上渗透系数的分量; h 为含水层水头; W 为源汇项; S_s 为贮水率; t 为时间。

研究区水头边界计算可以表述为

$$H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1}=H_0(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中: Γ_1 为水头边界; $H_0(x, y, z, t)$ 为第一类边界条件下在 Γ_1 上给定的水头边界函数。

研究区流量边界计算可以表述为

$$K\frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2}=q(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中: Γ_2 为流量边界; $q(x, y, z, t)$ 为补给流量; n 为 Γ_2 上的外法线单位向量。

研究区模型的识别和校核部分可以表述为

$$H(x, y, z, t)|_{t=0}=H_0(x, y, z) \quad (4)$$

式中: $H_0(x, y, z)$ 为初始地下水位分布。

2.5 模型识别与校核

2.5.1 模型时空离散 在水平方向上将研究区离散为 4 331 个 $65\text{ m}\times 120\text{ m}$ 的网格,在垂向上概化为 17 层,共计 73 627 个有效单元。本文根据 2022 年灌区实测地下水位数据资料,将模拟期定为 2022 年 1 月—2023 年 1 月,应力期为 1 个月,识别期定为 2022 年 4 月,校核期定为 2022 年 9—11 月。

2.5.2 模型识别与校核 为了体现模型的真实性和客观性,对建立的模型进行参数验证、识别和校核是不可或缺的。本研究采用“试错法”调整建立的三维非稳定流地下水流模型的水文地质参数,模拟研究区 2022 年 4 月流场,利用实测地下水位数据对模型进行识别。在获得与现实情况接近的模拟流场后,为增强模型的可靠度和精确度,在模型识别的基础上继续模拟,根据 2022 年 9—11 月的水位数据进行水位动态校核。

图 5 为区域模拟埋深分布和识别期线性拟合分布图。由图 5a 可知,地下水位埋深最低处位于研究

区中部豹子滩村西泉组,埋深在 0.3~0.8 m。由图 5b 可知:水位监测点地下水位实测值与模拟值的最大误差为 3.47 m,最小误差为 0.02 m;均方根误差

(RMSE)为 1.69,决定系数(R^2)达到 0.90,总体符合情况较好,计算值与实测值基本吻合,可用该模型来进行后续模型校核。

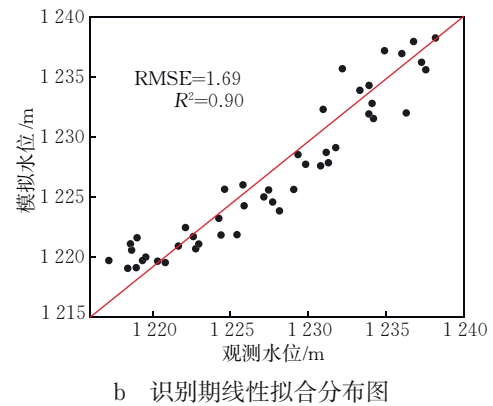
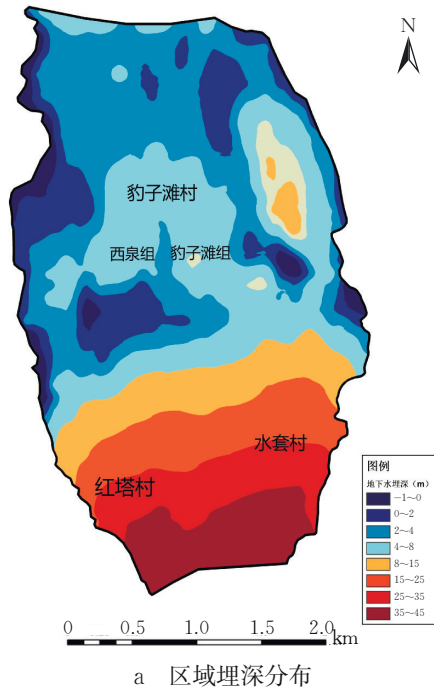
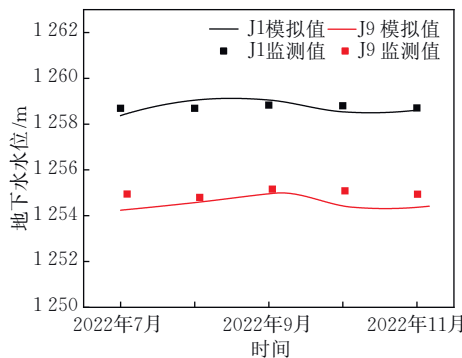


图 5 区域模拟埋深分布和识别期线性拟合分布图

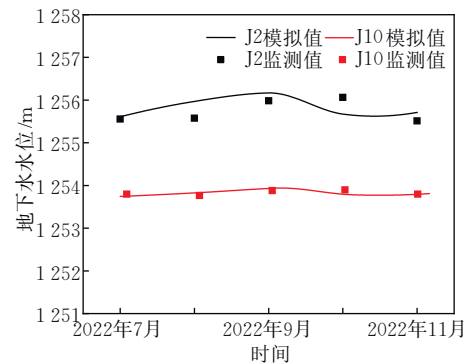
Fig.5 Regional simulated burial depth distribution and linear fitting distribution map for the identification period

图 6 为监测点地下水位动态拟合和校核期地下水位散点图。由图 6 可知:水位最小差值为

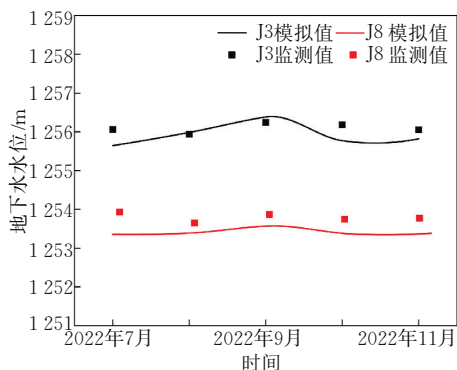
0.01 m,最大差值为 0.68 m;RMSE 为 0.36, R^2 达到 0.98,模型计算水位与观测水位之间有较好的适应



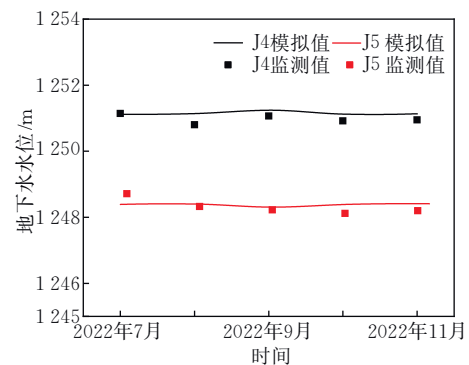
a J1,J9 监测点



b J2,J10 监测点



c J3,J8 监测点



d J4,J5 监测点

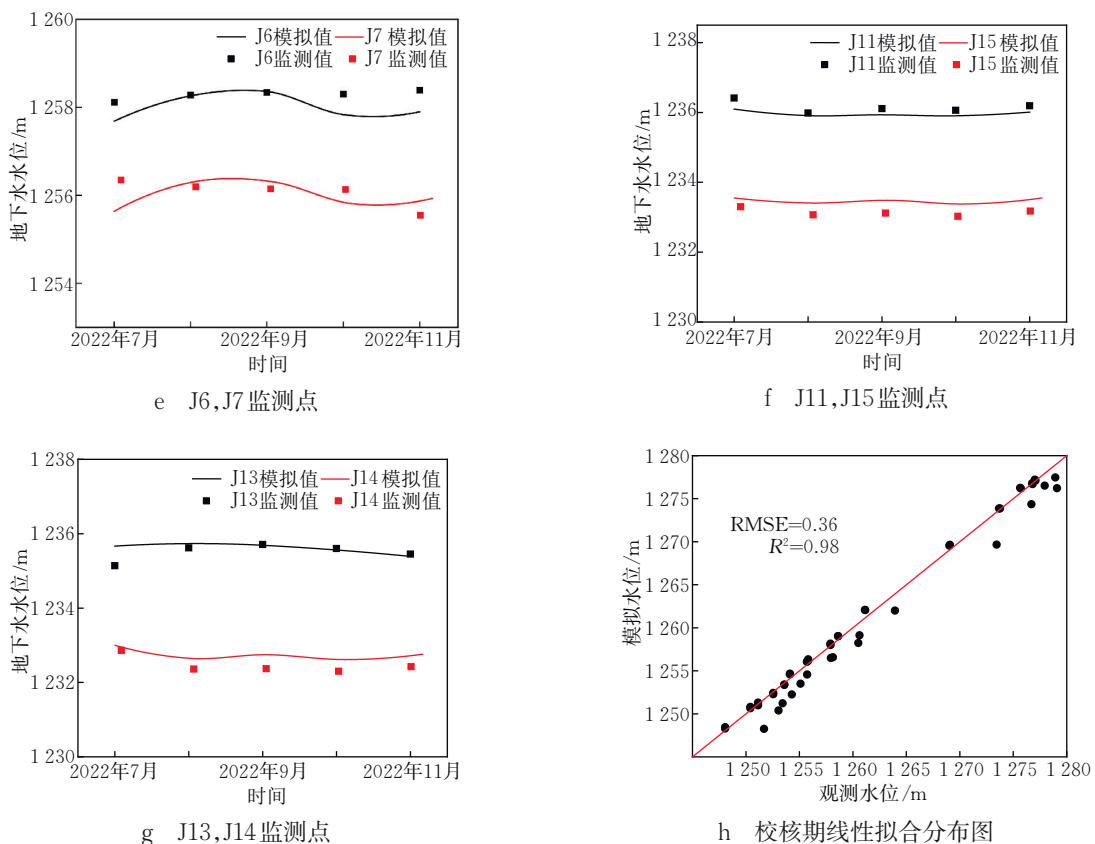


图 6 监测点地下水位动态拟合和校核期地下水位散点图

Fig.6 Groundwater level dynamics fitting at monitoring points and scatter plot of groundwater levels during the validation

性,大部分监测点水位拟合情况较好,可以利用该模型预测区域未来不同方案地下水动态变化。

模型水文地质参数选取参考研究区 2022 年开展的水文地质调查和环境物探资料,参数初步选取通过抽水试验和室内渗流试验得到。在对模型的识别与校核过程中,经过修正,模型最终选取的水文地质参数如表 2 所示。

表 2 模型水文地质参数

Tab.2 Hydrogeological parameters of the model

岩性分类	垂直渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	给水度
粉质黏土	0.79	0.05
素填土	1.40	0.08
细砂	12.40	0.20
细角砾土	28.92	0.30

3 数值模拟结果与分析

3.1 预测方案设计

为解决研究区地下水位过高和土壤盐渍化问题,本文从水资源集约节约利用、推动乡村振兴等方面出发,设置 4 种不同方案,如表 3 所示。方案一为

保持现状的对照方案,其余 3 个为治理方案。方案二中的灌溉定额根据宁夏回族自治区水利厅于 2021 年 7 月印发的《宁夏回族自治区用水权确权指导意见》确定,在高效节水灌溉条件下,灌区农业用水定额建议设置为 $190\sim 240 \text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{次})$,为保证一定冗余,设置为 $210 \text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{次})$;方案三中沟道开挖深度无固定经验值,为保证工程治理效果,设置沟道深度深于现有 4 m 沟深的西泉沟,截流排水沟的最终开挖深度设置为 5 m;方案四确定管井间距 20 m,设置抽水井 18 个。由图 5a 模拟的初始流场可知,地下水危害最严重的区域为豹子滩村西泉组南部,因此,方案三和方案四在豹子滩村以南边界采取截流措施对研究区进行治理。利用经过识别和校核后的地下水流模型预测未来 10 a 研究区在不同方案下地下水流场动态变化,选出最佳治理方案,缓解当地群众生活、生产困境,解决地下水位上升问题,遏制土壤进一步盐渍化。

3.2 模拟结果

为获知研究区在 4 种方案下 10 a 后的水位埋深,本文利用模型模拟不同方案 10 a 后的地下水埋深情况,如图 7 所示。模拟结果表明,除方案一地下

表3 预测方案设计

Tab. 3 Design of prediction schemes

编号	预测方案	具体设置
方案一	现状条件	保持模型边界条件不变,灌溉定额为 $360 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{次})$
方案二	高效节水	发展滴灌,灌溉定额为 $210 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{次})$
方案三	沟道截流	在豹子滩村以南边界设置大型截渗排水沟,沟道深度设置为 5 m
方案四	机井截流	在豹子滩村以南边界建设无砂混凝土排水管井一排,进行 24 h 抽水排水,设置抽水井 18 个,单井抽水流量为 $30 \text{ m}^3/\text{d}$

水位上升外,三种治理方案均可使研究区地下水位降低。方案一在未来 10 a 间水位继续上升,豹子滩村西泉组南部水位上升最为迅速,速率为 0.084 m/a ,

当地房屋开裂及盐碱化问题将加剧。高效节水方案治理效果较为显著,10 a 内平均水位下降 3.5 m ,受灾最严重的豹子滩村整体埋深大于 4 m 。沟道截

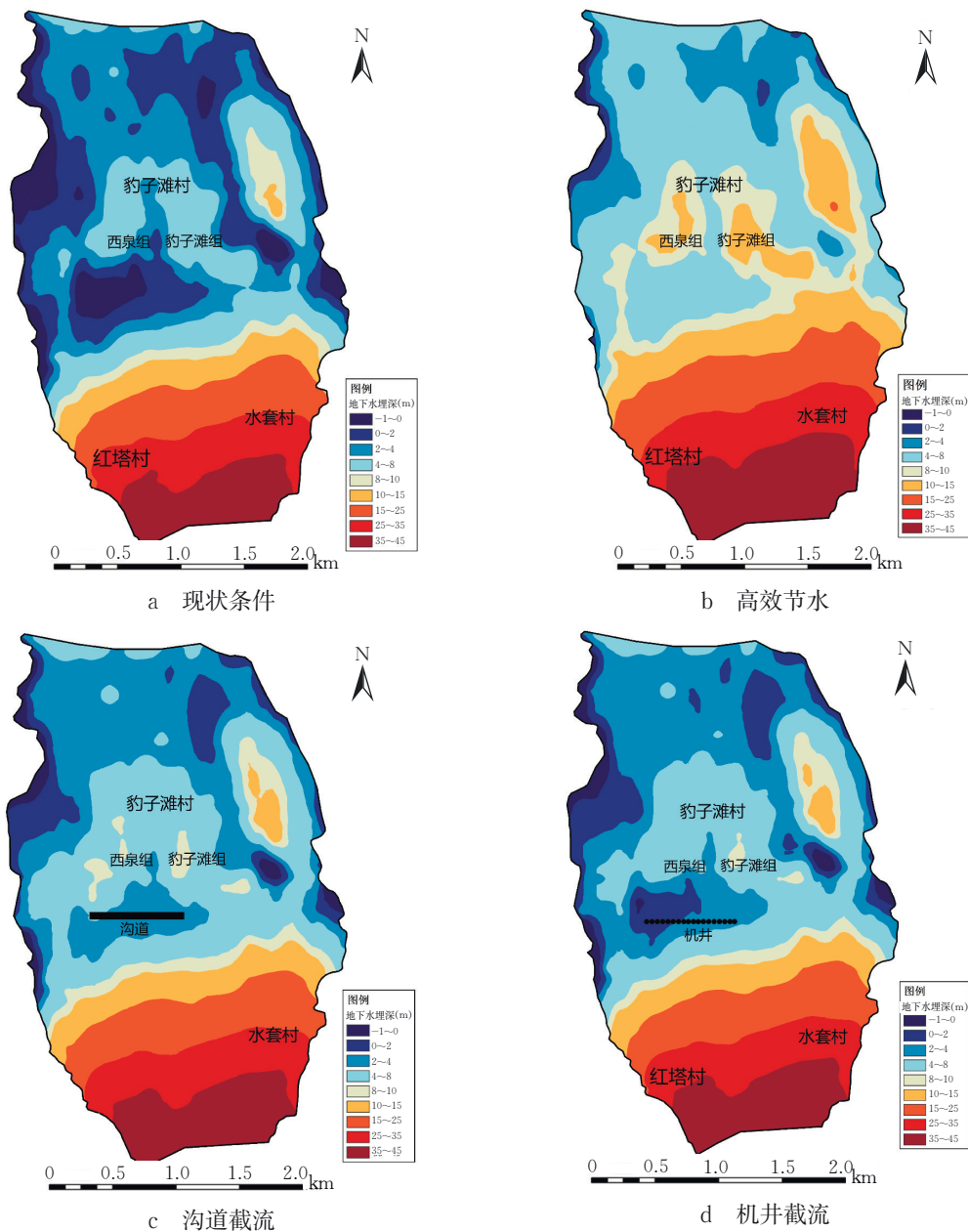


图7 未来 10 a 不同治理方案下地下水埋深分布图

Fig.7 Groundwater depth distribution maps under different governance scenarios over the next 10 years

流方案治理效果次之,主要对豹子滩村区域有一定的治理效果,豹子滩村整体埋深不低于 2 m,解决了西泉组南部小部分地区埋深低于 0 m 的情况。机井截流方案治理效果不明显,10 a 后村庄部分地区埋深低于 1 m 乃至接近 0 m,但研究区水位并未进一步升高。

为得到研究区在 4 种方案下未来地下水位埋深动态变化,通过监测点进行分析,如图 8 所示。对比 4 种方案的水位变化可知,不采取治理措施的方案一水位会继续升高,最大上升 1.46 m,平均上升

1.18 m;其余 3 种方案均对水位有一定的降低作用,典型监测孔水位变化幅度为高效节水方案>沟道截流方案>机井截流方案。高效节水方案在未来 10 a 可最大降低区域水位 4.8 m,平均降低 3.5 m;沟道截流方案可使区域水位最多下降 2.8 m,平均下降 1.8 m;机井截流方案可最大降低区域水位 0.68 m,平均降低 0.48 m。沟道截流方案和机井截流方案均在豹子滩村以南边界采取工程措施。位于村庄附近的 J11~J14 监测孔显示,工程措施对村庄水位降低起到一定作用,但研究区其他区域水位变化不明显。

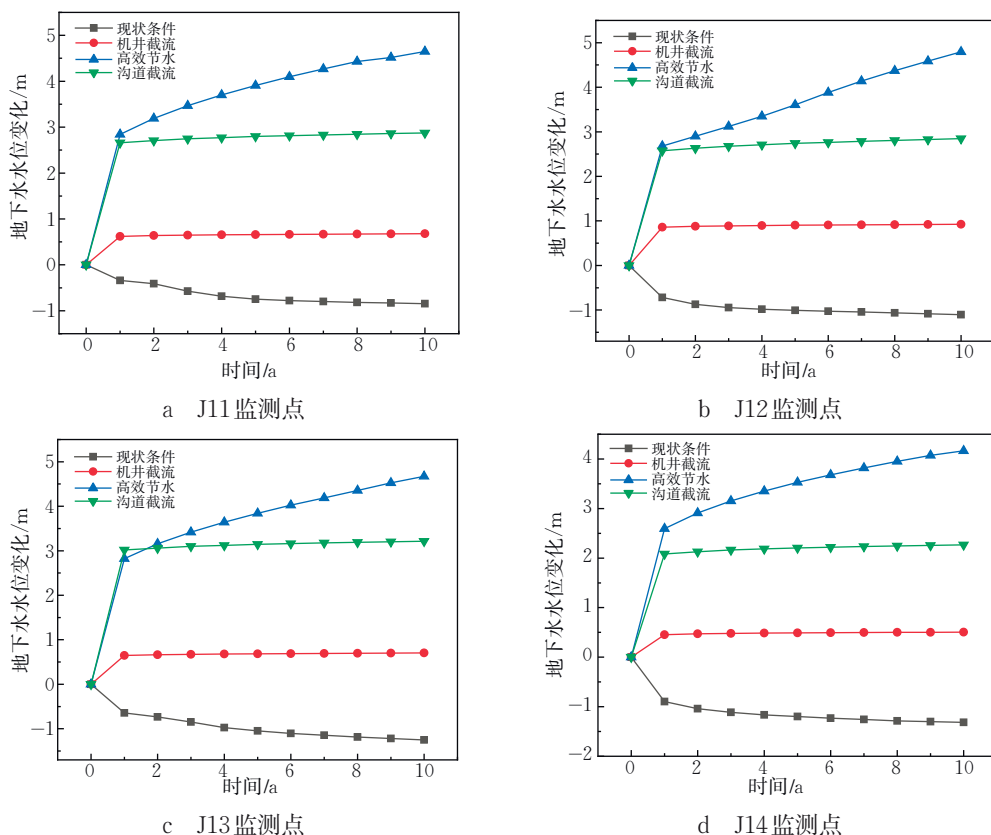


图 8 监测点 10 a 间地下水水位变化

Fig.8 Changes in groundwater levels at monitoring points over a 10-year period

3.3 讨论

随着计算机技术的发展,数值模拟在地下水资源评价、地下水开发利用的管理和规划等方面起到了至关重要的作用。然而在数值模拟的过程中,存在许多不确定因素,除了模型参数和模型输入的不确定性外,含水层渗透系数的非均质性在极大程度上影响模拟结果的正确性。在以往的地下水流模型中,受限于模拟所需水文地质资料的不连续、缺失等因素,一般根据经验对模拟区域进行参数分区,按照抽水试验结果对渗透系数等水文地质参数赋值。由于含水层普遍存在的非均质性,参数分区方法往往不能表征研究区域的参数详细分布特征,模拟预测

结果不一定准确。因此,能否定量描述渗透系数的空间分布是地下水数值模拟的关键。学者们采用蒙特卡罗随机模拟法、贝叶斯原理描述了二维简单算例的渗透系数分布,后续利用 PEST 模块、GLUE 方法对三维实际问题的参数分布特征进行表述^[34-37]。

本次模拟由于获取的钻孔岩性资料较为丰富,不同于以往的参数分区方法,较精确地刻画了渗透系数空间结构的变异性。基于地质统计学原理,通过空间插值方法建立携带渗透系数信息的三维地质模型,以此地质模型与划分的三维有限差分网格进行耦合得到地下水流模型。然而,钻孔地质资料在

研究区内分布不均,80%以上钻孔位于研究区中心豹子滩村庄区域,使得模型对村庄区域的渗透系数描述较为精确,其他区域的渗透系数分布可能与实际有一定偏差。鉴于本研究主要为分析预测村庄区域的地下水动态变化,上述非均质性刻画已满足研究目的,可为灌区典型受危害区域地下水位的准确模拟预测及实际治理提供理论基础。

通过本次模拟可以发现,灌区前期建设不应只聚焦于种植作物的可行性,还应注意节水灌溉制度建立和水文地质分析。随着灌区后续扩张,可能出现地下水位偏高问题,此时再更改灌区灌溉制度,现实可行性低,只能采用工程措施抑制水位升高。引黄灌区设立之初,灌区平均埋深大于 15 m,自 1998 年开发至今,灌溉面积不断扩大,当地供水条件不完善、未严格执行节水灌溉制度、种植作物灌水定额较大以及灌区土层透水能力差等多种因素叠加,导致当地地下水位持续上升,需设置治理方案解决现存的房屋开裂、土壤盐渍化等问题。

对比本次模拟设置的 3 种治理方案,高效节水方案治理效果最好,需要将原有的地面漫灌模式改为滴灌,该方案可提高水资源利用效率,减少灌溉深层渗漏,有效解决研究区出现的地下水危害。研究区实际灌溉面积为 1 087.93 hm²,占研究区总面积的 90% 以上,按照 3 万元/hm²的价格估算,全面实施高效节水方案经济成本达到 3 000 万元左右,方案的实际可行性较低。沟道截流方案需在村庄南部边界开挖截流排水沟,方案实施简单、村民接受程度高、易于维护、排水效果明显,经济成本 150 万元左右,该方案存在永久占地,有征地困难、乡镇难以承担征地费用等问题,在实际情形中可改为暗涵排水,临时占地。机井截流方案需在村庄南部边界建设排水管井,进行 24 h 不间断抽水,方案经济成本最小,为 70 万元左右,但方案存在诸多缺点,如治理效果弱于沟道截流方案,要求配置真空泵抽水,一旦水泵、电路故障,会造成地下水回升;全年不间断运行,电费较高,后期排水管内部堵塞难以维护处理。

4 结论

为解决宁夏引黄灌区地下水位偏高、土壤盐渍化问题,本文以灌区典型区域作为研究区,根据获得的钻孔、水文地质资料,构建了三维非均质地下水流数值模型,并预测了该区域在 4 种治理方案下未来 10 a 的地下水动态变化,主要得出以下结论。

(1)本文考虑了渗透系数的空间变异性,刻画了

含水层层状非均质特征,开展了基于非均质三维地质模型的宁夏引黄灌区不同治理方案下地下水位动态分析,模型能够准确反映引黄灌区地下水位动态变化过程。

(2)现状灌溉条件下,区域水位将继续上升,未来 10 a 平均水位上升 1.18 m,水位持续上升将对研究区造成更大危害;高效节水方案治理效果最好,平均水位降低 3.5 m;沟道截流方案平均水位降低 1.8 m;机井截流方案平均水位降低 0.48 m。

(3)从治理效果来看,高效节水方案是解决灌区问题的最佳方案,但考虑到治理方案的可行性,研究区灌溉面积过大,高效节水方案可行性较低,沟道截流方案较好。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩冬梅,周田田,马英,等.干旱区重度和轻度盐碱地包气带水分运移规律[J].农业工程学报,2018,34(18):152-159.
- [3] Singh A. Soil salinization management for sustainable development: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111383.
- [4] Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt A K, et al. Global mapping of soil salinity change [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111260.
- [5] 薛禹群.中国地下水数值模拟的现状与展望[J].高校地质学报,2010,16(1):1-6.
- [6] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等.地下水数值计算与应用研究进展综述[J].地学前缘,2010,17(6):1-12.
- [7] 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):99-104,110.
- [8] 宋昀,许洁,许书刚,等.苏锡常地下空间开发对地下水流动场的影响[J].地球科学,2025,50(11):4540-4550.
- [9] 贺向丽,叶懋,张昕,等.基于调控适宜性区域评价的红崖山灌区地下水位动态预测[J].农业工程学报,2018,34(18):179-186.
- [10] 曹思佳,李云良,李宁宁,等.鄱阳湖典型洪泛区地下水数值模拟研究[J].湖泊科学,2023,35(1):298-312.
- [11] Wu J C, Zeng X K. Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(25): 3044-3052.
- [12] Okofo L B, Martienssen M. A three-dimensional nu-

- merical groundwater flow model to assess the feasibility of managed aquifer recharge in the Tamne River Basin of Ghana [J]. *Hydrogeology Journal*, 2022, 30(4): 1071-1090.
- [13] 胡伏生, 陈连竹, 万力, 等. 含水层参数不确定性与地下水开采量可靠性评价[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(6): 675-682.
- [14] Ghosh B, Pekkat S. An appraisal on the interpolation methods used for predicting spatial variability of field hydraulic conductivity [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(6): 2175-2190.
- [15] Singh V K, Panda K C, Sagar A, et al. Novel genetic algorithm (GA) based hybrid machine learning-pedotransfer Function (ML-PTF) for prediction of spatial pattern of saturated hydraulic conductivity [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 1082-1099.
- [16] 顾文龙, 卢文喜, 马洪云, 等. 地下水数值模拟分析中降水入渗补给强度及渗透系数不确定性评价[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(11): 45-48, 64.
- [17] 李霞, 文章, 梁杏, 等. 基于解析法和数值法的非稳定流抽水试验参数反演[J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 743-750.
- [18] 桂春雷, 石建省, 刘继朝, 等. 含水层渗透系数预测及不确定性分析耦合模型[J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 521-528.
- [19] 张俊, 刘天罡, 董佳秋, 等. 含水层层状非均质对地下水水流系统的影响[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1715-1725.
- [20] 束龙仓, 许杨, 吴佩鹏. 基于MODFLOW参数不确定性的地下水水流数值模拟方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(6): 1803-1809.
- [21] 陈彦, 吴吉春. 含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J]. *水科学进展*, 2005, 16(4): 482-487.
- [22] 覃荣高, 曹广祝, 仵彦卿. 非均质含水层中渗流与溶质运移研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 30-41.
- [23] 刘猛, 束龙仓, 刘波. 地下水数值模拟中的参数随机模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(6): 25-27.
- [24] 韩忠, 邵景力, 崔亚莉, 等. 基于MODFLOW的地下水水流模型前处理优化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(4): 1290-1296.
- [25] 蒋立群, 孙蓉琳, 梁杏. 含水层非均质性不同刻画方法对地下水流和溶质运移预测的影响[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 4150-4160.
- [26] Gómez-Hernández J J, Gorelick S M. Effective groundwater model parameter values: Influence of spatial variability of hydraulic conductivity, leakance, and recharge [J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(3): 405-419.
- [27] Xue P P, Wen Z, Zhao D J, et al. Determination of hydraulic conductivity and its spatial variability in the Jiangnan Plain using a multi-format, multi-method approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125917.
- [28] Zhang Y, Gable C W, Sheets B. Equivalent hydraulic conductivity of three-dimensional heterogeneous porous media: an upscaling study based on an experimental stratigraphy [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3/4): 304-320.
- [29] Wang T, Liu Y Q, Wang J Z, et al. Assessment of spatial variability of hydraulic conductivity of seasonally frozen ground in Northeast China [J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: 105741.
- [30] 贺国平, 周东, 赵月芬, 等. 遥感技术和FEFLOW在北京市平原区地下水合理开发利用中的应用[J]. *地球学报*, 2006, 27(3): 277-282.
- [31] 吴乐, 张有全, 宫辉力, 等. 北京市西山地区地下水数值模拟及预测[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(3): 29-36.
- [32] 贾艳辉, 阎伟, 高巍, 等. 基于地下水数值模拟的宝山农场引江灌溉模式研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 111-117.
- [33] 刘中培, 李鑫, 陈莹, 等. 基于MODFLOW与气候模式的矿区地下水流模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2021(5): 113-117.
- [34] 桂春雷, 石建省, 刘继朝, 等. 含水层渗透系数预测及不确定性分析耦合模型[J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 521-528.

Three-Dimensional Heterogeneous Simulation and Prediction of Groundwater in the Ningxia Yellow River Irrigation District

GUO Zheng^{1,2}, DING Pengpeng^{1,2}, WAN Yukuai^{1,2}, DING Yimin^{1,2}, LIU Xuejun³, ZHU Lei^{1,2*}

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River, Yinchuan 750021, China;

3. Ningxia Institute of Water Resources and Hydropower Research, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study aims to analyze the dynamic changes in groundwater levels within the Ningxia Yellow River Irrigation District. By integrating hydrogeological and engineering geological survey data, it precisely characterized the geological heterogeneity of the study area and developed a three-dimensional heterogeneous transient groundwater flow model. Using numerical simulation methods, it forecast groundwater dynamics in the irrigation district. The results indicate that the constructed three-dimensional heterogeneous transient groundwater flow model accurately reflects the dynamic changes in groundwater within the irrigation district. Projections suggest a continued rise in groundwater levels, necessitating corresponding management measures to ensure safety for both residential and agricultural activities. The Baoditan village area exhibits poor soil permeability, rendering it one of the most severely affected regions by groundwater issues, with water table depths ranging from 0.3 to 0.8 m. It proposed various management strategies to address the existing groundwater level challenges. The high-efficiency water-saving strategy resulted in the most significant decrease in groundwater levels, followed by the channel interception strategy, with average groundwater level decline rate of 0.35 and 0.18 m/a, respectively. Considering both effectiveness and practical feasibility, the channel interception strategy is identified as the optimal solution for effectively mitigating groundwater hazards in the irrigation district.

Keywords: groundwater; Ningxia Yellow River Irrigation District; numerical modelling; heterogeneity; mitigation strategies

(责任编辑 王德平)

《西北工程技术学报(中英文)》 “新能源与新材料”特色栏目征稿启事

随着全球新一轮科技革命和产业变革的蓬勃兴起,新能源、新材料以前所未有的速度加快迭代,成为经济社会创新发展的驱动力。为积极响应国家重大战略,聚焦科技前沿,《西北工程技术学报(中英文)》设置了“新能源与新材料”特色栏目,现面向国内外征集相关综述和原创研究论文(要求不涉密、可公开)。

征稿范围(建议但不限于):1. 绿氢生产,氢氨化利用,氢能储备运输,储能电站,光电、风电系统,高倍聚光发电系统;2. 晶硅光伏电池,新型太阳能电池,锂电池,燃料电池,新型薄膜电池等器件及材料;3. 金属材料及合金,先进结构材料,先进功能材料,电子信息材料,人工晶体材料,半导体材料与器件等;4. 新能源系统及优化。

投稿方式及格式:请登录网址 <http://net.nxu.edu.cn>,进入《西北工程技术学报(中英文)》主页,点击“在线投稿”进入作者工作中心,按系统要求填写信息,上传稿件时需在题目中注明“新能源与新材料”栏目投稿。论文模板及要求请参见期刊网站首页的“作者中心”。

联系人:王德平 联系电话:0951-2061708