

山西省地下水数字孪生系统建设路径探讨

张 钰¹, 王慧如², 毋晓琴¹

(1. 山西省水利发展中心, 030002, 太原; 2. 江苏科兴项目管理有限公司, 210093, 南京)

摘 要: 山西省是我国北方地区地下水超采较为严重的省份之一, 地下水管理面临超采治理、生态保护与高质量发展多重压力。构建地下水数字孪生系统是破解山西地下水管理难题的关键举措。本文系统梳理了地下水管理需求, 提出山西省地下水管理数字孪生系统建设路径。从全要素数据库构建入手, 整合多源数据, 借助3S、BIM技术构建“数据底板”并建立数据动态更新机制; 打造模型群, 建立精细化的三维地下水流数值模拟模型与溶质运移模拟模型, 耦合优化算法形成地下水数值模拟-优化耦合模型; 开发“四预”仿真模块, 实现不同周期水位预报、多级预警、多情景预演及预案库建立。地下水数字孪生系统建成后可为地下水管控指标落实、地下水取水监管、地下水超采治理、地下水资源科学配置等地下水智慧化管理提供有力支撑, 推动地下水管理从“经验驱动”转向“数据驱动”。

关键词: 地下水管理; 地下水超采治理; 数字孪生系统; 地下水数值模型; “四预”; 数据驱动; 山西省

Exploration of the construction path of a groundwater digital twin system in Shanxi Province

ZHANG Yu¹, WANG Huiru², WU Xiaoqin¹

(1. Shanxi Provincial Water Conservancy Development Center, Taiyuan 030002, China; 2. Jiangsu Kexing Project Management Co., Ltd., Nanjing 210093, China)

Abstract: Shanxi Province is one of the regions in northern China where groundwater over-exploitation is relatively severe, and groundwater management is confronted with multiple pressures, including over-exploitation control, ecological protection, and high-quality development. The construction of a groundwater digital twin system is a key approach to addressing the challenges of groundwater management in Shanxi Province. This paper systematically analyzes the demands of groundwater management and proposes a construction path for a groundwater management digital twin system in Shanxi Province. Starting from the establishment of a full-element database, multi-source data are integrated, and a “data base” is constructed with the support of remote sensing, geographic information systems, and global positioning systems (3S technologies) and building information modeling (BIM), together with the establishment of a dynamic data updating mechanism. A group of models is developed, including a refined three-dimensional groundwater flow numerical model and a solute transport simulation model, which are coupled with optimization algorithms to form a simulation-optimization coupled model. In addition, a “four pre” simulation module (forecast, early-warning, rehearsal, and contingency planning) is developed. After completion, the groundwater digital twin system can provide strong support for the implementation of groundwater management control indicators, supervision of groundwater abstraction, control of groundwater over-exploitation, and scientific allocation of

收稿日期: 2025-09-23

作者简介: 张钰, 工程师, 主要从事水资源管理方面研究工作。

通信作者: 王慧如, 工程师, 主要从事地下水模拟及优化管理方面研究。E-mail: wanghuiru03017@sina.com

基金项目: 山西省水利发展资金项目“地下水数字孪生系统与‘四预’覆盖建设”(14000022214T200000854)。

groundwater resources, thus promoting the transformation of groundwater management from experience-driven to data-driven.

Keywords: groundwater management; groundwater over-exploitation control; digital twin system; groundwater numerical model; forecast, early-warning, rehearsal, and contingency planning; data-driven; Shanxi Province

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)02-0066-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.02.009

一、引言

地下水是山西省经济社会发展和生态环境维持的重要水源之一。在大规模开采地下水和煤矿开采对水资源破坏的双重作用下,山西省地下水超采问题突出,形成19个超采区,面积达7383 km²,出现岩溶泉水断流、地面沉降等一系列生态环境问题,严重制约区域可持续发展。针对地下水超采问题,山西省在“制度+工程+监管”治理体系下综合施策,通过地下水生态补水、关井压采、关停和限制重点保护区矿产开采等措施,减缓了地下水水位严重下降的势头。

但是受限于水资源禀赋、地下水开发利用强度高、煤炭开采生产模式转型困难等不利因素的持续影响,全省地下水超采现象尚未得到根本治理。在当前山西省地下水未实现采补平衡的时期,地下水累计超采量仍会持续增加,地下水超采治理工作仍任重道远。当前水利行业正在推进数字孪生体系建设,地下水数字孪生建设方面进度明显滞后于地表水,目前具有“四预”(预报、预警、预演、预案)功能的地下水数字孪生系统尚未可见,难以满足新阶段水利高质量发展要求。另外,地下水管理智慧化建设方面仍存在“监测有余、预测不足”短板,无法实现对地下水管理活动进行超前仿真推演、评估优化等功能,距离“四预”目标仍有较大距离。

从目前山西省地下水管理及超采治理困局看,构建具有“四预”功能的地下水数字孪生系统可为地下水管理由被动应对向主动预防转变提供关键技术支撑。

二、地下水管理需求

近年国家对地下水管理要求日趋严格,主要表现在以下方面。

1. 地下水超采治理精准化

山西省自2018年以来被纳入华北地下水超采综合治理试点,各地结合需求,积极申报中央水利发展资

金开展地下水超采治理。山西省地下水超采区分布广泛,不同区域地质条件、开采强度差异显著,如何比选不同区域、不同治理工程的治理效果,提高资金使用效益,需要精准化的模型进行分析计算。

2. 水资源“双控”管理

2020年2月水利部印发《关于开展地下水管控指标确定工作的通知》,组织各省(自治区、直辖市)以县级行政区为单位确定地下水取用水量、水位等管控指标。另外根据水利部印发的《关于开展地下水超采区水位变化通报工作的通知》要求,定期开展地下水水位变化通报工作,严格地下水水位管控。在控制指标约束下科学合理地制定地下水开发方案还缺乏技术支撑。

3. 生态保护协同

山西省是我国北方岩溶地貌分布面积最广、半干旱区岩溶特征最典型的地区,共有19处岩溶大泉,泉域总面积6.4万km²,占全省总面积的41%。由于岩溶地区地貌形态多变,岩溶系统的补给、径流、排泄特征复杂,岩溶裂隙分布极不均匀,岩溶通道发育极不规律,岩溶泉域地下水系统具有强烈的非均质性和各向异性,使得在岩溶地区科学制定泉域生态保护策略变得十分困难。

三、山西省地下水数字孪生系统建设路径

根据地下水管理需求,按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,以数字化、智能化为主线,以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径,以算据、算法、算力建设为支撑,实现地下水开发利用监督管理及地下水超采治理的预报、预警、预演、预案功能,为山西省地下水开发利用、超采治理、战略储备与监测预警等提供智能化、精细化、动态化决策支持。山西地下水数字孪生系统架构见图1。

1. 系统数据底板

数据库是数字孪生系统的核心支撑,需实现对地下水系统自然要素、人类活动与监测数据的全面整合

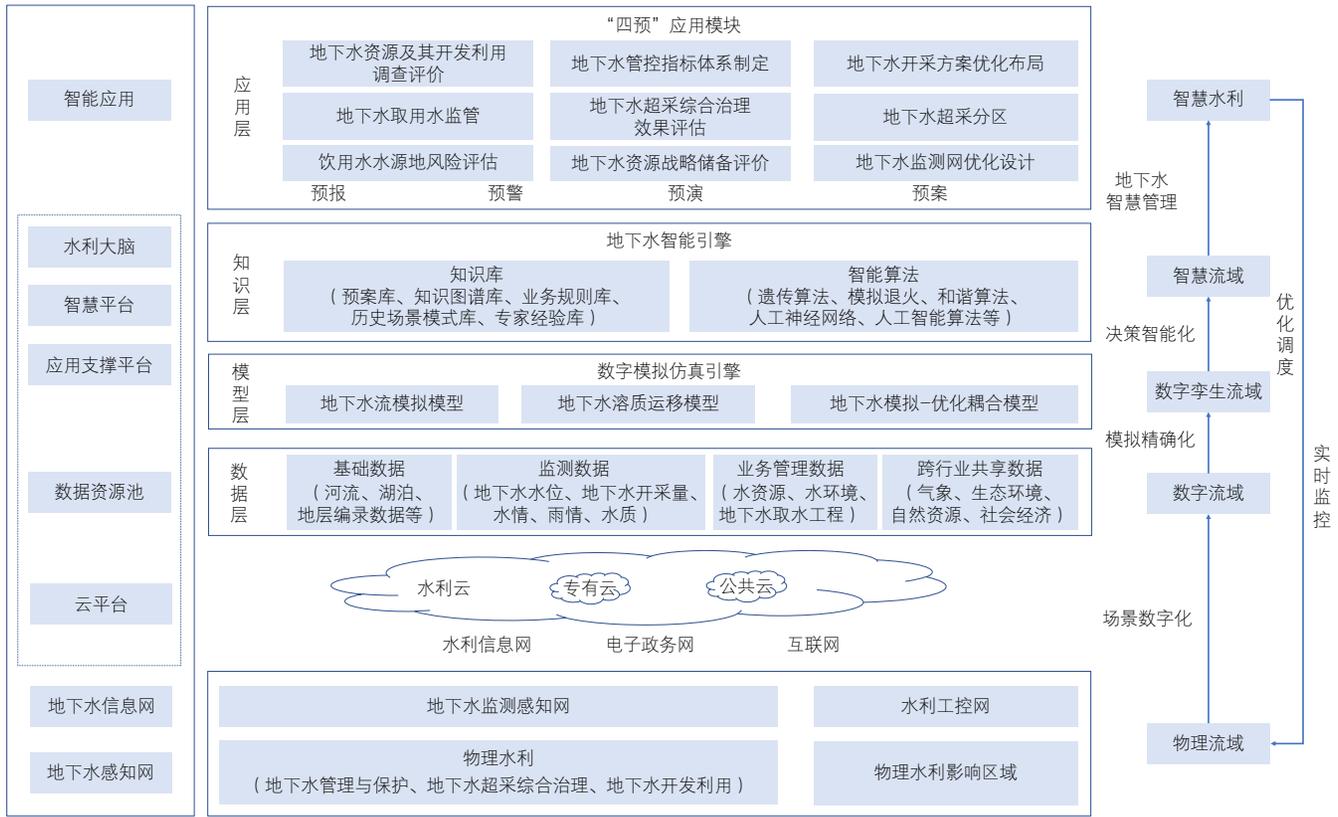


图1 山西省地下水数字孪生系统架构

与动态更新。

(1) 多源数据汇集

整合气象(降水、蒸发)、水文(地表径流、灌溉回归水)、地质(地层岩性、构造)、水文地质(含水层结构、渗透系数)等自然数据;收集地下水开采量、取水工程分布、水源置换工程参数等人类活动数据;汇集全省1538处自动监测站的水位、水质等实时数据,通过标准化处理,消除数据格式、时空基准差异,形成跨行业、跨部门的数据集。

(2) 数字化映射与“数据底板”构建

借助3S(RS、GIS、GPS)、BIM(Building Information Modeling)技术,以水利部划定的水文地质单元为基本单元,严格遵循《数字孪生流域建设技术导则》(SL/T 853—2025)、《水利信息分类与编码总则》(SL/T 701—2021)等规范要求,对地下水系统进行标准化三维空间概化。将含水层、隔水层按统一网格精度转化为数字化模型,加密超采区、泉域、煤矿开采区等关键区域。将监测井、开采井等工程作为空间节点,精准录入坐标(采用2000国家大地坐标系)、深度、用途等核心属性,构建标准化地下水流概念模型。在此基础上叠加水利部统一的1:5万省级行政区划、1:1万关键区域土地利

用、河流水系等基础图层,整合水文地质、监测监控、业务管理等多源数据,形成覆盖山西全省的地下水数字孪生系统数据底板。

数据底板格式严格遵循行业标准:矢量数据采用SHP、GeoJSON格式,栅格数据采用TIFF格式,三维模型采用IFC(BIM标准)、3DTiles(GIS三维标准)格式,属性数据采用JSON格式存储,确保与国家水利数据共享交换平台无缝衔接。通过该数据底板实现地下水系统全要素、全空间、全周期的数字化映射,为后续模型计算、模拟仿真、决策分析提供标准化、高精度的数据支撑。

(3) 数据动态更新机制

建立“实时+定期”的数据更新机制,对水位、开采量等高频数据,基于物联网技术搭建传输通道,采用LoRa、NB-IoT等协议,实现水位、开采量等高频数据分钟级交互,保障关键信息实时反馈;对水文地质参数、经济社会用水指标等低频数据,采用“年度调查结合模型反演校正”的方式,每年通过野外实测补充参数,结合年度监测数据反演优化,确保数据精度匹配地下水系统演化规律;针对水源置换与替代、地下水回补与生态补水、节水与控水、地下水监测等

超采治理工程,建立“验收—核验—录入”闭环流程。工程竣工后通过现场实测、资料审核完成核心数据标准化核验,7日内通过批量导入或接口对接完成系统录入,关联水文地质单元与数据底板,实现工程效应与系统模拟动态耦合。

2. 模型群构建

模型群是数字孪生系统的“大脑”,需通过数值模拟与智能优化技术耦合实现对地下水系统动态模拟、趋势预测与方案优化。

(1) 地下水数值模拟模型建立

基于MODFLOW等开源工具,在地下水流概念模型构建成果的基础上,建立覆盖全省的三维地下水流数值模拟模型,并利用地下水水位观测数据进行模型检验校正,修正模型中不同地区的渗透系数、降水入渗系数、灌溉回归系数等参数以及模型边界条件等,进一步细化三维地下水流数值模拟模型,使其模拟结果更加真实可信(三维地下水流模型构建流程见图2)。重点细化地下水超采区、泉域等关键区域的模型精度,针对煤矿开采区,需单独量化矿坑排水对地下水流场的影响,提高模型可靠性。

另外,针对地下水点源污染、面源污染等问题,也可基于MT3DMS等软件构建溶质运移模拟模型,细化分析典型污染物对地下水系统的影响。

(2) 模拟—优化耦合模型建立

基于三维地下水流数值模拟模型,与国际较为成熟的优化算法(遗传算法GA、模拟退火算法SA、禁忌搜索算法TS等)相耦合,建立地下水数值模拟—优化耦合模型(地下水数值模拟—优化耦合模型构建流程见图3)。通过计算,获取地下水水位、水量控制指标下的最优开采方案,如在水位控制指标下获取最大取水量的开采方案,或在水量控制指标下区域地下水水位下降最少的开采方案,为山西省各下辖行政区构建地下水水量—水位双控技术体系提供参考,同时也为地下水取水许可审批提供决策工具。

3. “四预”仿真模块构建

预报、预警、预演、预案是数字孪生系统的核心功能,需通过模块化设计,实现从数据采集到决策落地的全流程支撑。

(1) 预报模块

基于嵌入的地下水数值模拟模型,在不同区域开展短期(1年内)、中期(5年内)、长期(10年内)地下水水位预报。输入未来开采计划、降水预测等参数,生

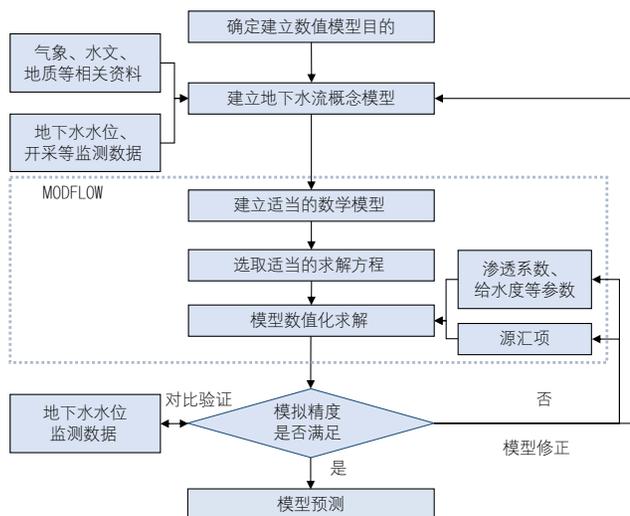


图2 三维地下水流数值模拟模型构建流程

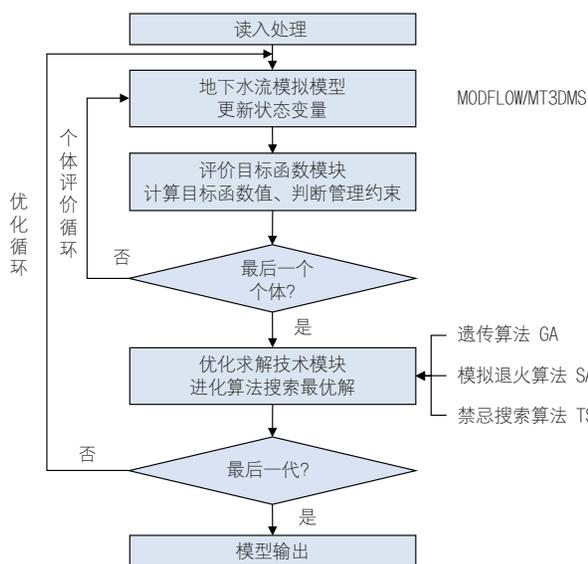


图3 地下水数值模拟—优化耦合模型构建流程

成不同情景下的水位变化曲线。例如,运城市盐湖区模型预报显示,若维持现有开采强度,2030年浅层地下水水位将较现状下降3~5 m,需通过水源置换工程压减开采量15%以上方可实现采补平衡。预报结果定期报送市(县)水行政主管部门,为年度用水计划制定提供依据。

(2) 预警模块

建立多级预警体系,针对水位下降速率(如单月下降超0.5 m)、水位管控指标(如地下水水位埋深不可超过30 m)、区域取水总量指标(如单井取水量不可超过许可水量)、水质超标(如矿化度超2 g/L)等指标设置阈值,结合实时监测数据与预报结果,对已经超过

阈值指标或未来可能超过的阈值指标风险自动触发预警,有效防范地下水管理过程中的“灰犀牛”事件。如盐湖区通过该机制,提前识别出王范乡工业自备井超采风险,及时采取了封井措施。

(3) 预演模块

针对地下水超采治理项目(如水源置换、节水灌溉)、重大工程(如煤矿疏干水利用),设置多组参数开展预演。设定不同情景目标,实时分析地下水管理及超采综合治理工作面临的风险以及未来可实现的治理成果,生成可行的地下水管理方案集,对各方案进行模拟仿真预演,为制定预案提供支撑。例如,在盐湖区预演“引黄灌溉面积扩大1万亩”“封闭工业井20眼”两种方案,通过对比水位回升幅度确定最优组合。预演结果作为中央水利发展资金项目申报的重要依据,提高资金配置效率。

(4) 预案模块

基于地下水数值模拟-优化耦合模型,结合地下水管理及超采治理工作状况、经济社会发展现状及需求等,对预演结果进行分析评估,滚动调整优化相关治理工作方案,建立预案库,有效提高预案的科学性、有效性、指导性和可操作性。如:针对干旱年份,生成地下水应急开采限量方案;针对岩溶污染,生成污染井封堵、应急供水预案等。

四、山西省地下水数字孪生系统应用场景

1. 地下水资源及其开发利用调查评价

地下水资源调查评价是地下水状况评价的首要任务,是掌握地下水资源数量与质量,摸清地下水时空分布的基础工作,可为地下水开发利用、节约保护、治理管理提供基础支撑。基于数值模拟模型,可精确评估计算区内地下水资源量及保持水位稳定的合理开采量。

2. 地下水管控指标体系制定

地下水管控指标确定工作是地下水监督管理特别是地下水超采治理的重要抓手。基于地下水数值模拟-优化耦合模型,各地可获取地下水水位、水量控制指标下的最优开采方案,以及开展地下水水位预警管理等工作。

3. 地下水水位变化情况通报

地下水超采区水位变化通报工作是保护地下水资源、改善生态环境、实现可持续发展的迫切需要。基于地下水数值模拟-优化模型,各地可获取既满足当地地下水用水需求又能尽量保持地下水水位不下降的地下水开发利用方案。

4. 地下水取用水许可审批及监管

地下水取用水许可审批是加强水资源统一配置,规范地下水开发利用行为的重要抓手。基于数值模拟模型,可精确预测新增地下水取水井对区域地下水水位的影响,也可以预测拟建设的开采井的最大可开采量,为水资源论证审批提供依据。同时也可地下水管理部门确定未来合理的审批空间提供依据。

5. 地下水超采治理方案确定

地下水超采治理工作是实现地下水采补平衡、维持地下水永续利用的最主要抓手,基于数值模拟模型,可以精确评价不同治理措施产生的压采效果,作为制定地下水治理方案的主要依据。

6. 地下水监测网优化设计

地下水动态监测网优化设计的研究目标就是以最小的投入(减少监测井个数、减小取样频率等),获取满足一定地下水研究精度的信息,进而优化设计地下水动态监测井的密度和监测频率。基于地下水数值模拟-优化耦合模型,可提出在已有监测站网基础上的加密布设方案,从而获取更佳的监测效果。

五、小结

构建地下水数字孪生系统是山西省破解地下水超采治理难题的核心路径,其建设与应用贯穿框架设计、核心内容、开发逻辑、长效运维及场景落地全链条,形成闭环支撑体系。在框架设计上,系统严格遵循“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,构建物理层-规范适配层-数据层-模型层-知识层-应用层“六级联动架构”,全面与国家数字孪生流域建设规范衔接,确保技术路径合规性与可扩展性;开发逻辑上坚持“数字化场景、智慧化模拟、精准化决策”主线,以算据、算法、算力协同建设为支撑,聚焦超采治理精准化、水资源“双控”管理、生态保护协同等核心需求,实现技术研发与管理需求的深度耦合。

在核心内容与长效运维层面,系统以全要素数据库为基础,通过多源数据标准化整合、3S与BIM技术支撑的高精度“数据底板”构建及数据动态更新机制筑牢数据底座,以三维地下水流数值模拟模型、溶质运移模型及地下水数值模拟-优化耦合模型组成的模型群实现动态模拟与方案优化,以预报-预警-预演-预案“四预”模块形成全流程智慧决策支撑。同时建立标准适配、接口互通、安全防护、全流程监控的运维机制,确保数据实时鲜活、模型动态校准、系统稳定运行,

保障系统长期服务于地下水管理实践。

在应用价值层面,该系统可全面支撑地下水资源调查评价、管控指标制定、取用水许可审批、超采治理方案优化、监测网布局调整等核心业务,有效推动地下水管理从“经验驱动”向“数据驱动”、从“被动应对”向“主动预防”转型。

参考文献:

- [1] 杨玉霞,张天宇,闫莉,等.黄河流域汾渭谷地地下水超采综合治理思路研究[J].水利发展研究,2024,24(7):41-46.
- [2] 山西省水利厅.山西省地下水超采综合治理实践成效[J].中国水利,2022(6):10-15.
- [3] 苗宗雷.山西省翼城县地下水超采现状及对策[J].河南水利与南水北调,2023,52(4):42-43.
- [4] 蔡阳.以数字孪生流域建设为核心构建具有“四预”功能智慧水利体系[J].中国水利,2022(20):2-6+60.
- [5] 冶运涛,蒋云钟,梁犁丽,等.数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J].水科学进展,2022,33(5):683-704.
- [6] 李国英.加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[J].水利建设与管理,2022,42(9):1-2.
- [7] 杨得瑞,杜丙照,黄利群,等.加强地下水管理 促进高质量发展[J].中国水利,2021(7):1-4.
- [8] 水利部.关于开展地下水管控指标确定工作的通知[A].2020.
- [9] 水利部.关于开展全国地下水超采区水位变化通报工作的通知[A].2020.
- [10] 王志恒,梁永平,史浙明,等.古堆-南梁泉域岩溶水环境问题现状与泉源区保护[J].地质科技通报,2023,42(5):228-240.
- [11] 王万金,郑明英.基于水均衡分析岩溶山区地下水系统特征——以某开放型岩溶地下水系统为例[J].地下水,2023,45(2):24-26.
- [12] 罗利川.岩溶水系统识别及水文过程模拟研究[D].北京:中国地质大学,2023.
- [13] 茹哲敏.山西省地下水专用监测站布设与规划分析[J].山西水利,2023(7):39-40.
- [14] 中华人民共和国水利部.数字孪生流域建设技术导则:SL/T853—2025[S].北京:中国水利水电出版社,2025.
- [15] 中华人民共和国水利部.水利信息分类与编码总则:SL/T701—2021[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [16] 杨俊松,汪名鹏,薛玫红.江苏沐阳主城区地下水含水层结构三维可视化建模初探[J].地下水,2022,44(2):29-31.
- [17] 吴剑锋,朱学愚.由MODFLOW浅谈地下水流数值模拟软件的发展趋势[J].工程勘察,2000(2):12-15.
- [18] 魏亚强,陈坚,张铎,等.基于Python的地下水模拟研究进展与应用[J].计算机技术与发展,2021,31(5):150-156.
- [19] 郭晓东,田辉,张梅桂,等.我国地下水数值模拟软件应用进展[J].地下水,2010,32(4):5-7.
- [20] ZHENG Chunmiao, WANG P P. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide[R]. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.
- [21] 钱家忠,吴剑锋,朱学愚,等.地下水资源评价与管理数学模型的研究进展[J].科学通报,2001(2):99-104.
- [22] 杨蕴,吴剑锋,吴吉春.两种智能算法在求解地下水管理模型中的对比[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(3):474-481+502.
- [23] MCKINNEY D C, LIN M D. Genetic algorithm solution of groundwater management models[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6):1693-1704.
- [24] 宋凡,刘二佳,肖航,等.数字孪生技术使能智慧地下水[J].水利信息化,2023(1):1-7.
- [25] 闫丽.太原市兰村泉域岩溶地下水数值模拟及水资源合理开发利用研究[D].太原:太原理工大学,2015.
- [26] 唐克旺,侯杰,于丽丽.基于功能的地下水控制水位确定方法[J].中国水利,2015(9):30-32.
- [27] 刘志峰.北方岩溶区建设项目地下水资源论证模式研究[D].泰安:山东农业大学,2008.
- [28] 闫苗祥.杏花超采区地下水环境修复及数值模拟的研究[D].太原:太原理工大学,2014.
- [29] 刘邑婷.区域地下水位监测站网优化布局研究[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [30] 郭燕莎,王劲峰,殷秀兰.地下水监测网优化方法研究综述[J].地理科学进展,2011,30(9):1159-1166.

责任编辑 吕彩霞