

水文地质模型在地下水资源评价中的应用

王建刚 高 星

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要: 地下水资源是支撑经济社会发展和生态环境稳定的重要战略资源,科学评价是实现其可持续开发利用的核心前提。水文地质模型作为量化地下水运动规律的有效工具,已广泛应用于地下水资源评价领域。本文系统梳理水文地质模型的理论基础与构建流程,重点分析其在地下水资源量评价、开采方案优化中的具体应用,涵盖补给量、储存量、排泄量评价及开采潜力分析、情景模拟等核心环节,探讨模型应用的关键要点,为提升地下水资源评价的科学性提供理论支撑与实践参考。

关键词: 水文地质模型;地下水资源评价;可持续发展

引言: 随着工业化、城镇化进程加快,地下水过度开采与污染问题日益突出,水资源供需矛盾加剧,对地下水资源评价的科学性提出更高要求。传统评价方法依赖经验公式,难以全面反映复杂水文地质条件下地下水的动态变化规律。水文地质模型通过整合水文地质数据、模拟地下水运动过程,能够量化地下水系统各项参数,为资源评价提供更精准的技术支撑。

1 水文地质模型理论基础

水文地质模型的构建与应用以水文地质学、地下水动力学、数学建模等理论为核心基础。其核心理论包括地下水赋存与运动规律、含水层渗透特性、地下水与地表水及大气水的相互转化关系等。地下水动力学中的达西定律揭示了地下水渗透速度与水力坡度、渗透系数的定量关系,为模型中地下水运动方程的建立提供了核心依据。含水层系统理论强调将地下水视为有机整体,明确含水层的分布特征、边界条件及内部结构,是构建水文地质概念模型的重要指导。数学建模理论为水文地质模型的量化提供方法支撑,通过将水文地质过程转化为数学方程,实现对地下水动态变化的精准模拟^[1]。根据模型特点,可分为解析模型与数值模型、确定性模型与随机模型等不同类型,不同类型模型适用于不同研究目的和水文地质条件。不确定性分析理论、参数识别理论等,进一步完善了水文地质模型的理论体系,提升了模型应用的科学性与可靠性。

2 水文地质模型构建的基本流程

2.1 水文地质概念模型的建立

水文地质概念模型是水文地质模型构建的基础,是对研究区域地下水系统的简化与抽象,核心是明确地下水系统的边界条件、含水层结构、水文地质参数及地下水运动特征。构建过程中,首先需通过野外勘察、资料

收集等方式,梳理研究区域的地形地貌、地层岩性、含水层分布、地下水补给排泄条件等基础资料,明确地下水系统的空间范围与边界类型,包括自然边界(如分水岭、隔水层边界)与人为边界(如流域管理边界)。其次,划分含水层与隔水层,明确各含水层的岩性、厚度、渗透性能等核心特征,识别地下水的补给来源(如大气降水入渗、地表水补给)与排泄途径(如蒸发、开采、径流排泄)。最后,通过简化复杂水文地质现象,剔除次要因素,构建能够真实反映地下水系统核心特征的概念模型。概念模型的质量直接影响后续数学模型与数值模型的可靠性,是确保模拟结果准确性的关键前提。

2.2 数学模型与数值模型建立

数学模型是水文地质概念模型的量化表达,通过建立数学方程描述地下水运动的动力学过程,核心包括地下水运动方程、初始条件与边界条件。根据研究区域地下水运动类型(如孔隙水、岩溶水),选择合适的运动方程,如孔隙介质中地下水运动采用达西定律推导的渗流方程,岩溶地下水运动采用裂隙渗流方程。初始条件主要明确研究初期地下水的水位、水量等状态参数,边界条件则量化系统边界的水力特征,包括定水头边界、定流量边界、自由水面边界等类型。数值模型是将数学方程离散化,通过数值计算方法求解的模型,常用方法包括有限差分法、有限单元法等^[2]。通过将研究区域离散为网格单元,将连续的地下水运动方程转化为离散的代数方程,利用计算机软件(如MODFLOW、FEFLOW、GMS等)进行求解,实现对地下水动态变化的模拟与预测。模型建立需注意空间离散精度与计算效率的平衡。

2.3 模型参数识别与校准

模型参数识别与校准是确保水文地质模型可靠性的关键环节,核心是通过实测数据调整模型参数,使模型

模拟结果与实际情况趋于一致。模型参数主要包括渗透系数、给水度、储水系数、弥散度等,这些参数直接影响模型模拟的准确性。参数识别可通过野外试验(如抽水试验、注水试验、示踪试验)获取初步参数,再结合长期监测数据进行优化调整。校准过程中,选取研究区域内长期监测的地下水位、水量等数据作为验证依据,将模型模拟结果与实测数据进行对比,计算误差值如均方根误差、平均绝对误差等,通过迭代调整参数,直至误差控制在合理范围(通常水位拟合误差不超过10%)。校准完成后,需用未参与校准的独立观测数据对模型进行验证,检验模型的预测能力。校准后的模型能够更精准地反映地下水系统的动态变化规律,为后续地下水资源评价提供可靠支撑。

2.4 不确定性分析

水文地质模型的不确定性主要源于参数不确定性、边界条件不确定性、数据不确定性等,不确定性分析是评估模型可靠性与应用风险的重要环节。参数不确定性主要由于含水层岩性不均匀、参数测量误差、空间变异性等导致,边界条件不确定性源于对地下水系统边界的认知不足和概化简化,数据不确定性则来自监测数据的误差、观测频率不足、资料缺失等。常用的不确定性分析方法包括敏感性分析、蒙特卡洛模拟等。敏感性分析用于识别对模型结果影响最大的参数,明确参数变化对模拟结果的影响程度;蒙特卡洛模拟通过随机生成参数组合,多次运行模型,统计模拟结果的分布特征,评估模型的不确定性范围。通过不确定性分析,可明确模型应用的局限性和预测结果的可信度,为地下水资源评价决策提供风险信息,避免单一确定性结果带来的决策风险。

3 水文地质模型在地下水资源量评价中的应用

3.1 地下水补给量评价

地下水补给量是地下水资源量评价的核心指标,水文地质模型通过模拟地下水补给过程,精准量化各类补给量。补给主要包括大气降水入渗、地表水渗漏、侧向径流和灌溉回归入渗等,模型整合降水、地表水位、灌溉等数据,结合含水层渗透参数,模拟补给过程强度与分布。降水入渗作为面状补给,采用入渗系数法或非饱和带模拟法确定,考虑包气带岩性和地下水位埋深。地表水渗漏通过河流模块处理,根据河水位与地下水位关系计算渗漏量。侧向径流补给依据边界水力梯度和导水系数,运用达西定律计算。与传统经验公式相比,模型能够考虑水文地质差异和补给时空变化,提升补给量评价精准性,为资源量计算和均衡分析提供可靠依据。

3.2 地下水储存量评价

地下水储存量是储存于含水层中的地下水总量,对维持供水安全和生态基流具有重要意义。水文地质模型通过明确含水层分布范围、厚度、给水度、储水系数等参数,结合水位监测数据,精准计算储存量。储存量包括容积储存量和弹性储存量:潜水含水层储存量变化与给水度相关,表现为潜水面升降;承压含水层储存量变化与储水系数相关,表现为弹性释水。模型模拟地下水位时空变化,量化不同时期、不同区域的储存量,分析动态变化趋势,如丰水年计算储存量增加,开采期和枯水年模拟消耗过程^[3]。储存量评价服务于人工调蓄工程规划,通过模拟不同回灌方案优化布局。对于超采区,可量化资源亏损,为超采治理提供依据。

3.3 地下水排泄量评价

地下水排泄量是资源量平衡的重要组成部分,包括蒸发排泄、侧向径流排泄、人工开采排泄和向地表水体排泄,其评价直接影响资源量计算精度。水文地质模型模拟排泄过程,结合气象、水文、开采等数据,量化各类排泄量。蒸发排泄采用蒸发模块处理,根据潜水位埋深、气象条件和土壤输水能力计算蒸发强度,埋深越小蒸发越大。向地表水体排泄取决于地下水与地表水水力关系,模型需准确刻画河床高程、水位变化和河床渗透性。人工开采作为主要排泄方式,需考虑井群分布和开采季节性。模型能够刻画排泄项间的相互影响,如开采增加可能减少向河流排泄,甚至改变补排关系,揭示排泄项竞争关系,为水均衡分析提供精准数据。

3.4 水均衡分析与资源量计算

水均衡分析是地下水资源量评价的核心方法,水文地质模型整合补给、储存、排泄模拟数据,实现水均衡精准分析。模型遵循“补给总量-排泄总量=储存变化量”原理,计算均衡状态,判断系统处于正均衡、负均衡或均衡状态。分析需关注时间尺度:年均衡反映年内变化,多年均衡揭示长期趋势;分区均衡分析揭示不同水文地质单元差异。结合均衡结果,计算可开采资源量,即不破坏系统平衡、不引发生态问题前提下的合理开采量。确定方法包括多年平均补给量扣除不可调节排泄量、水位约束下最大持续开采量、不同频率年补给量对应可开采量等。与传统方法相比,模型动态模拟水均衡变化,提升资源量计算精准性。

4 水文地质模型在开采方案优化与调控中的应用

4.1 地下水开采潜力评价

地下水开采潜力评价是在摸清资源家底的基础上,分析含水层进一步增加开采的可行性及限制因素,为水资源规划提供依据。水文地质模型可综合资源、环境、技术、

经济等多重约束,实现科学评价。水位下降是首要约束,过度开采会导致水位持续下降,增加提水成本并引发水源枯竭,模型通过模拟不同开采强度下的水位响应,以区域平均水位降深阈值或敏感点水位高程为约束,确定可开采量。松散沉积层地区需重视地面沉降约束,模型可耦合水流与沉降模型,模拟开采引发的沉降过程,确定沉降阈值下的允许开采量。耦合地表水-地下水模型可模拟开采对河流基流的影响,确定生态基流约束下的可开采量。评价需考虑不同水文年份情景,丰水年、平水年开采潜力较大,枯水年潜力较小甚至需压采。评价结果可为区域用水结构优化、水源替代工程规划、应急供水能力建设等提供科学参考。

4.2 开采方案情景模拟

开采方案情景模拟借助水文地质模型,预测不同开采方案下地下水系统的响应,为方案比选和决策提供定量支撑。核心是设置合理的对比方案,系统评估各方案的利弊得失。不同开采布局情景主要模拟开采井空间分布的影响,集中开采易形成局部降落漏斗、加剧环境地质问题,分散开采利于资源均衡利用,模型可模拟井群优化布局,对比不同布井方案的供水效果和环境效应。不同开采强度情景聚焦开采总量扰动,设置现状开采、增产、压采等情景,模拟不同强度下水位、均衡变化及环境影响,绘制开采强度-水位降深关系曲线,明确开采的弹性区间和敏感区间^[4]。不同补给条件情景关注气候变化和人类活动的影响,设置丰水、平水、枯水等水文年份情景,以及水利工程调控、土地利用变化等情景,分析补给条件变化对地下水系统的间接影响。时间维度上可分为短期、中期和长期模拟,分别服务于应急供水、规划编制和可持续性检验。多情景对比分析能够揭示各种方案的优缺点和适用条件,支撑科学决策。

4.3 地下水管理模型

地下水管理模型以水文地质模拟为基础,引入优化方法实现资源调配的智能化决策。模拟-优化耦合是核心,将模拟模型作为约束嵌入优化框架,模拟模型计算决策

变量对应的系统响应,优化模型搜索最优方案。根据优化目标可分为三类:水量优化模型以供水效益最大、缺水损失最小、水位恢复最快等为目标,优化开采量分配和时序;水质优化模型以污染风险最小、治理成本最低为目标,优化污染源控制和修复布局;多目标优化模型兼顾经济效益与生态环境影响,通过帕累托前沿分析提供非劣解集,供决策者权衡选择。优化算法包括线性规划、非线性规划、遗传算法、粒子群算法等,智能算法可处理复杂优化问题。模型可确定地下水水位控制红线,结合地质承载力分析设定最低水位和预警阈值;优化人工调蓄方案,综合水文地质、水源等因素确定回灌参数;优化污染防控方案,评估不同措施的削减效果和成本效益。随着数字孪生技术发展,地下水管理正从离线优化向在线调控转变,实现动态智能管理。

结束语

水文地质模型作为地下水资源评价的核心技术工具,凭借其精准模拟地下水运动规律、量化水文地质过程的优势,在地下水资源量评价、开采方案优化与调控中发挥着不可替代的作用。从理论基础到构建流程,从资源量评价到开采方案优化,水文地质模型为地下水资源管理提供了全方位的技术支撑。未来,需进一步完善模型构建技术,加强多场耦合模拟研究,提升模型的适用性与可靠性,充分发挥其在地下水资源管理中的支撑作用,助力实现地下水资源的可持续开发与生态环境的协同保护。

参考文献

- [1]连会青,晏涛,尹尚先,等.基于透明水文地质模型的工作面顶板水害预警研究[J].煤炭科学技术,2025,53(1):259-271.
- [2]申海生,李刚,王成龙,等.复杂地质环境下煤矿水文地质模型构建研究[J].自动化应用,2025,66(9):59-62.
- [3]山龙江,邢继飞,孙延宗.基于水文地质模型的区域水环境地下水开发研究[J].科学技术创新,2025(21):162-165.
- [4]陈国立.水文地质结构可视化模型构建探析[J].黑龙江水利科技,2025,53(3):29-32.