

水文地质勘查中地下水动态监测与数值模拟研究

王龙龙

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i6.6412

[摘要] 水文地质勘查的核心任务之一是查明区域水文地质条件,评价水资源量及其可利用性,为水资源开发、利用、保护与灾害防治提供科学依据。本文系统论述地下水动态监测与数值模拟技术在水文地质勘查全链条中的关键作用,结合特殊地区典型地貌单元的勘查实践,详细阐述监测网络设计如何服务于勘查目标、数值模拟如何支撑勘查阶段的资源评价与预测预警,并探讨技术瓶颈与发展方向。研究强调,动态监测与数值模拟的深度融合是现代水文地质勘查从定性描述走向定量预测、从静态评价转向动态管理的必然要求,对保障水资源安全与生态稳定具有重大实践价值。

[关键词] 地质勘查; 地下水动态监测; 数值模拟; 水文地质参数; 水资源评价

中图分类号: P5 文献标识码: A

Research on Groundwater Dynamic Monitoring and Numerical Simulation in Hydrogeological Surveys

Longlong Wang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design, and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] The core task of hydrogeological surveys is to clarify regional hydrogeological conditions and evaluate water resource availability, providing a scientific basis for the development, utilization, protection, and disaster prevention of water resources. This paper systematically discusses the critical role of groundwater dynamic monitoring and numerical simulation technologies throughout the hydrogeological survey process. Combining practical survey experiences in typical geomorphological units of special regions, it elaborates on how monitoring network design serves survey objectives and how numerical simulation supports resource assessment, prediction, and early warning during survey phases. Additionally, technical bottlenecks and future development directions are explored. The study emphasizes that the deep integration of dynamic monitoring and numerical simulation is an inevitable requirement for modern hydrogeological surveys to transition from qualitative description to quantitative prediction and from static assessment to dynamic management, holding significant practical value for ensuring water resource security and ecological stability.

[Key words] geological survey; groundwater dynamic monitoring; numerical simulation; hydrogeological parameters; water resource assessment

引言

在水文地质勘查中,以目标为导向精心设计的动态监测网络,以及在勘查全过程中对监测数据的即时解读与应用,是确保勘查方案科学优化、关键参数精准获取、水资源评价与开发方案切实可行的基石。它将静态勘查升级为动态响应的智慧勘查,是应对复杂水文地质条件与生态挑战不可或缺的核心技术手段。与此同时,将数值模拟技术深度嵌入水文地质勘查流程,将离散的勘查数据升华为系统性的动态认知,不仅是验证概念模型、反演关键参数的精密仪器,更是精准评价资源、优化开采方案、量化环境风险的核心决策平台。在水资源高效利用与生态

安全屏障建设的重大需求下,地下水动态监测与数值模拟已成为推动水文地质勘查从“查明现状”向“预测未来”、从“资源评价”向“智慧管理”跃迁的核心引擎。

1 地下水动态监测

地下水动态监测绝非水文地质勘查中的孤立环节,而是贯穿项目设计、实施与成果综合全过程的关键支柱,始终服务于勘查的核心目标——精准认知区域水文地质条件并科学评价水资源。

1.1 地下水监测网络布设

监测网络的布设必须紧密契合勘查阶段的核心目标与

区域独特的水文地质特征, 并在新疆严酷的自然环境中保证可行性。

1.1.1 区域普查/预查阶段

此阶段目标在于初步查明区域含水层结构框架及主要补给-径流-排泄格局。监测网络设计强调整体控制性与宏观规律捕捉。

(1) 核心剖面布设。沿着关键的水文地质演变路径(如山前至盆地中心), 布设穿越潜水-承压水系统的监测井剖面至关重要。例如, 沿天山北麓玛纳斯河至古尔班通古特沙漠方向布设的剖面, 通过持续监测水位梯度和水质指标(如矿化度、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子)的动态变化, 能够揭示地下水从山前补给区向盆地内部排泄区运移过程中的宏观演变规律。这是识别并初步圈定区域主要补给区、径流带和排泄区, 构建区域水文地质概念模型不可或缺的实证基础。

(2) 水转化界面监测。在主要河流(如塔里木河、伊犁河)沿岸以及大型灌区(如叶尔羌河灌区)边缘地带布设监测点, 旨在初步评估地表水(河流水、灌溉水)与地下水之间相互转化的强度与空间范围。这些关键节点上获得的水位、水温及水质动态数据, 为后续详查阶段优选重点勘查靶区提供了科学依据。

1.1.2 详细勘查/勘探阶段

此阶段目标聚焦于精准评价特定靶区(如拟建水源地、生态敏感区)的资源量、可开采性及生态可持续性, 监测网络设计追求高度精细化与强针对性。

(1) 水源地勘查。围绕拟开采靶区, 需构建多环监测井群系统。内环井群紧邻开采井, 实时捕捉开采影响下的水位降落漏斗形态、扩展速度及停抽后的恢复能力; 中环井群控制含水层关键参数分区; 外环井群则界定系统边界或潜在威胁源(如咸水体)。重点监测内容包括漏斗动态、是否诱发咸水入侵(如艾比湖周边水源地面咸水侧向入侵风险)或水质恶化(如农业区硝态氮浓度升高趋势)。这些实时动态数据是精确计算地下水可开采量、科学设计开采方案(井距、布局、开采量)及制定风险防控措施的直接支撑。

(2) 生态敏感区勘查。在维系生态平衡的关键区域(如天然胡杨林保护区、尾间湖泊博斯腾湖周边), 监测网络需精准捕捉生态水位阈值(即维持典型植被健康生长的临界地下水埋深)和潜水水质(尤其是矿化度)的动态变化。长期连续的监测数据是科学评价生态需水量、设定生态约束性开采红线、防止生态退化的核心依据。

1.2 地下水监测数据在水文地质勘查中的意义

监测数据贯穿勘查全过程, 其作用远超事后记录。在勘查初期, 简易监测孔的水位动态可初步揭示富水性分区和区域径流方向, 为后续勘探孔位优化布置及抽水试验设计(如落程、时长选择)提供关键指导; 在抽水试验进行时, 外围监测孔的响应动态则是识别边界性质(定水头、隔水或越流)、验证含水层均质性以及评估参数计算可靠性的核心依据, 有效克服了单孔试验的局限性; 更重要的是, 长期连续监测是精准量化降水入渗、地

表水(河道、渠系)渗漏补给、潜水蒸发排泄等关键水均衡通量的唯一可靠途径——尤其在新疆极端干旱区, 结合包气带水势与含水量监测反演精确测定蒸发量, 对于水资源评价和维系生态水位至关重要; 同时, 监测数据持续捕捉着季节性(融雪期、灌溉期、枯水期)和年际尺度(丰枯年)的水位、水质(电导率、特征离子)波动规律, 深刻揭示含水层系统对外部驱动(气候波动、人类活动)的响应模式, 为构建可靠的水文地质概念模型奠定不可或缺的动态基础。

2 数值模拟

在水文地质勘查, 特别是详查与勘探阶段, 数值模拟技术已从辅助工具跃升为不可或缺的核心引擎。它通过整合海量、多源、动态的勘查数据, 构建定量化平台, 实现概念模型的严格验证、资源量的精准评价以及开采影响的前瞻预测, 显著提升了勘查成果的科学深度与决策支撑价值。

2.1 勘查阶段模型构建: 从概念模型到参数识别

数值模拟的成功始于一个可靠的水文地质概念模型, 在新疆复杂多变的地质背景下, 这一模型的精炼高度依赖于多学科勘查数据的深度融合。

2.1.1 概念模型精炼

(1) 山前倾斜平原(洪积扇群)。基于测绘、物探和钻探揭露的地层结构, 结合动态监测网络揭示的水位流场、水化学分带以及动态响应特征, 构建初始概念模型。模型必须清晰刻画: ①典型的“二元结构”含水系统(上部潜水-下部承压水及其间的弱透水层); ②从扇顶(粗大卵砾石、高渗透性)到扇中(砂砾石)再到扇缘(粉细砂夹粘性土、渗透性骤降)的岩性空间变异导致的强非均质性; ③主要补给源的空间分布(如河道渗漏集中在扇顶主河道、渠系渗漏沿灌溉网络分布)和排泄方式(扇缘蒸发、泉水溢出、侧向流出)。

(2) 大型盆地。面对巨厚沉积层、复杂的多层含水层系统、超长距离的缓慢径流、强烈的蒸发排泄以及古封存水/咸水体的分布挑战, 概念模型构建尤为艰巨。长期动态监测数据是识别区域流场宏观模式、验证侧向补给/排泄通量估算合理性、以及推断深层咸水体与浅层淡水体之间水力联系强度的核心依据。物探和钻探揭示的深部构造(如基底起伏、阻水断层)则为模型边界设定提供地质约束。

2.1.2 数学模型建立与参数反演

(1) 模型平台选择。选用成熟、经过广泛验证的软件平台(如MODFLOW-USG处理复杂非均质结构, FEFLOW处理变密度流或热耦合问题)建立三维地下水流数值模型。当勘查目标涉及水质(如咸淡水界面运移、硝酸盐污染)或包气带过程(如精细评价入渗)时, 需耦合溶质运移模块(如MT3DMS/MT3D-USGS)或包气带模块(如MODFLOW的UZF1包)。

(2) 整合反演与参数识别。数值模拟在此阶段最强大的功能在于其强大的数据整合与参数反演能力, 它将所有独立来源的勘查数据转化为模型的约束条件和校正目标: ①钻探/物探揭示的含水层结构几何形态, 如顶底板高程、厚度、透镜体位置; ②

单孔/群孔抽水试验获取的局部尺度参数,如渗透系数 K 、储水/给水度 S/S_y ;③动态监测网络长期记录的时空连续的水位/水质变化数据;④利用监测数据独立估算的源汇项通量,如基于包气带监测计算的降水/融雪入渗补给量、基于浅埋区水位波动估算的潜水蒸发量。利用PEST, PEST++等先进的参数估计工具,模型通过反演过程,识别 K , S , 补给量、蒸发系数等参数值,使得模型计算结果能够最优地、系统性地拟合所有观测到的数据(水位动态、泉流量、化学浓度等)。这一过程本质上是利用整个模型系统作为一个巨大的“天然试验场”,克服了传统方法依靠有限点抽水试验计算参数难以表征空间变异性和无法协调解释所有观测现象的致命局限。在新疆,反演尤其需要精细刻画蒸发排泄系数(蒸发随埋深、表层岩性、植被覆盖的变化)的空间强变异性,这对于干旱区水资源评价的准确性至关重要。

2.2 数值模拟在勘查核心任务中的应用

数值模拟技术作为现代水文地质勘查的关键支撑手段,在资源评价、方案比选和风险预测三大核心任务中发挥着不可替代的作用。通过建立精细化的水文地质数值模型,能够实现勘查成果从定性描述向定量评价的跨越,为水资源开发决策提供科学依据。

(1)在地下水资源量评价方面,数值模型通过“天然状态”模拟可精确量化各类补给项(降水入渗、山前侧向补给、河道渗漏等)和排泄项(潜水蒸发、泉水溢出、侧向流出等)的时空分布特征,其基于系统动态响应的评价结果显著优于传统水均衡法。特别是在可持续开采量核定这一勘查核心任务中,模型通过多情景模拟(不同开采布局、强度和组合),在满足水位降深约束、泉水流量维持、咸淡水界面稳定和生态水位阈值等限制条件下,确定最大允许开采量及其空间分布。以吐鲁番盆地坎儿井水源区为例,数值模拟确保了在规划开采量下,坎儿井流量始终高于维持绿洲生态和文化遗产保护所需的最小流量 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2)在开采方案优化方面,数值模拟为多方案比选提供了定量分析平台。通过模拟不同水源地布局(如集中式与分散式)和开采强度下的流场响应,可系统评估各方案对区域地下水系统的影响程度、稳定性和可持续性。同时,模型还能有效评估人工补给措施的潜力,如模拟洪水资源化利用对地下水位恢复的效果。在玛纳斯河流域的勘查实践中,模型预测通过优化河道渗漏补给可增加地下水可采量12%,为水资源综合利用策略的制定提供了关键支撑。

(3)在环境风险预测领域,数值模拟展现出独特的预警能

力。通过耦合水流与溶质运移模型,不仅可以预测不同开采情景下的水位动态变化,还能准确模拟咸淡水界面移动、污染物迁移扩散等过程。在生态效应评估方面,将胡杨林区3.5m临界埋深等生态指标作为模型约束条件,可定量预测开采活动对敏感生态系统的影响范围和程度。天山北麓某水源地的模拟结果显示,当开采量超过 $1.2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 时,将导致下游湿地水位降至生态阈值以下,这一结论直接影响了最终开采方案的确定。

3 结束语

地下水动态监测与数值模拟并非水文地质勘查的附加项,而是其实现从现象描述到机理揭示、从静态评价到动态预测跃升的核心技术体系。监测是勘查的“感知神经”与“验证标尺”,为勘查方案设计提供依据,为钻探与试验部署提供实时反馈,为关键水文过程提供直接量化手段,是构建可靠概念模型的基础;模拟是勘查的“分析大脑”与“预测引擎”,整合多源异构勘查数据,反演刻画系统参数,精炼概念模型,最终实现地下水资源量的科学评价、开采方案的优化比选、环境风险的定量预测,为勘查报告的核心结论(资源量、可持续性、保护建议)提供坚实的定量支撑。未来,面对新疆特殊挑战(厚包气带、强蒸发、生态脆弱),需在勘查实践中持续加强包气带过程监测与模拟、非均质性参数精细刻画、三水转化通量校核、生态约束量化以及数据同化等技术的应用,不断提升勘查成果的精度、可靠性和前瞻性。唯有如此,水文地质勘查才能真正成为保障新疆水资源安全与生态稳定的科学基石。

【参考文献】

- [1]潘秋林.关于水利工程中的工程地质和水文地质勘查工作[J].低碳世界,2022,12(1):023.
- [2]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,(1):16.
- [3]郭勇,尹鑫卫,李彦.农田-防护林-荒漠复合系统土壤水盐运移规律及耦合模型建立[J].农业工程学报,2019,(17):012.
- [4]冷冬,王文茂,栾庆军.矿山地质勘查中水文地质相关问题及解决对策[J].世界有色金属,2020,(20):11.
- [5]童彦钊,吴平,韩强强.地下水数值模拟软件简述[J].科技信息,2011,(29):14.

作者简介:

王龙龙(1994--),男,汉族,宁夏银川人,本科,助理工程师,研究方向为地质勘察。