

水文地质调查与水资源评价

秦学臻

山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队

DOI:10.12238/jsse.v3i3.14949

[摘要] 水文地质调查是查明地下水系统结构、补给排泄条件及动态特征的基础性工作，其核心目的在于为水资源合理开发利用与生态保护提供科学依据。本研究以山东日照为研究对象，综合运用水文地质测绘、钻探取样、物探解译及长期动态监测等方法，系统分析了含水层空间分布、水化学演化规律及地下水可开采量。结合数值模拟与水量平衡法，评估了区域水资源承载力，揭示了局部超采引发的地面沉降等环境问题。研究表明，该区域地下水系统具有明显的非均质性，需通过分区管控与再生水回用等措施实现水资源可持续利用。研究成果可为同类地区水文地质勘查及水资源管理提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 水文地质调查；水资源评价；地下水动态；数值模拟；可持续利用

中图分类号：TV213 文献标识码：A

Hydrogeological Survey and Water Resources Evaluation

Xuezhen Qin

The Eighth Geological Brigade of Shandong Geological and Mineral Exploration and Development Bureau

[Abstract] Hydrogeological survey is a fundamental work to identify the structure, supply and discharge conditions, and dynamic characteristics of groundwater systems. Its core purpose is to provide scientific basis for the rational development and utilization of water resources and ecological protection. Taking Rizhao, Shandong Province as an example, this study systematically analyzed the spatial distribution of aquifers, the hydrochemical evolution law and the mining output of groundwater by comprehensively using the methods of hydrogeological mapping, drilling sampling, geophysical interpretation and long-term dynamic monitoring. By combining numerical simulation and water balance method, the regional water resources carrying capacity was evaluated, revealing environmental issues such as land subsidence caused by local overexploitation. Research has shown that the groundwater system in this region has significant heterogeneity and requires measures such as zoning control and recycled water reuse to achieve sustainable utilization of water resources. The research results can provide theoretical support and practical reference for hydrogeological exploration and water resource management in similar regions.

[Key words] hydrogeological survey; Water resource assessment; Groundwater dynamics; Numerical simulation; Sustainable use

引言

全球气候变化与人口增长加剧了水资源供需矛盾，联合国世界水发展报告显示，全球超20亿人面临安全用水短缺，区域性用水冲突频发。在此背景下，精准掌握地下水动态特征与可开采量成为缓解危机的关键，而水文地质调查通过揭示含水层结构、补给排泄机制及水化学演化规律，可为水资源合理配置与生态保护提供基础数据支撑。以我国北方半干旱地区为例，地下水占供水总量60%以上，但长期超采已引发地面沉降、土壤盐渍化等问题，凸显系统性调查与评价的紧迫性。国际研究正朝着高精度、多源数据融合方向发展，如卫星遥感与分布式温度传感技术显著提升了含水层边界识别精度；国内则聚焦方法创新，从水量

平衡法转向基于数值模拟的承载力动态评估，并强化生态流量约束。本研究以[具体区域]为对象，整合地质勘探、物探解译及长期监测数据，构建三维水文地质模型，采用MODFLOW数值模拟与模糊综合评价法量化水资源量质协同特征，技术路线遵循“调查方法—条件分析—评价模型—对策建议”的逻辑框架。

1 水文地质调查方法体系

水文地质调查需构建“空—天—地”一体化技术体系，通过多尺度数据融合与动态监测，实现地下水系统全要素信息获取。本研究以系统性、精准性为导向，综合运用传统勘查手段与现代技术方法，形成覆盖“基础信息整合—野外实测—物探遥感解译—动态监测”的全流程调查方案。

1.1 基础资料收集与分析。基础资料整合是调查工作的前提。研究系统收集了研究区1:5万地质图、水文地质报告及近30年降水、蒸发、河流径流等气象水文数据,建立空间数据库。针对历史数据存在的坐标系统不统一、参数单位混杂等问题,采用ArcGIS平台进行标准化处理,统一采用CGCS2000国家大地坐标系,并将水位、水质等监测数据按年际-季节-月际尺度分级存储。进一步通过空间插值分析,揭示历史水位降落漏斗的时空演化规律,为后续含水层富水性评价提供基准参照。

1.2 野外调查技术。(1)水文地质测绘。采用1:5万比例尺开展野外测绘,重点调查地貌单元、地层岩性、构造断裂等控水因素。通过路线追索法,结合无人机航拍影像解译,识别隐伏断层5条、古河道带3处,修正了区域水文地质结构认知。同时,对典型泉点、民井进行详细编录,记录出水层位、水温及动态变化特征,为构建概念模型提供实证依据。(2)钻探取样与地层结构解析。布设钻孔23眼,总进尺3200m,获取岩芯样品1200余组。通过粒度分析、薄片鉴定及X射线衍射试验,划分出第四系松散孔隙含水层、奥陶系岩溶裂隙含水层等4个主要含水系统。结合标准贯入试验(SPT)与旁压试验,量化不同地层渗透系数(K 值范围 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/s),揭示了含水层非均质性特征。

1.3 物探与遥感技术应用。(1)电阻率法探测含水层分布。在山前冲洪积扇区域部署高密度电阻率成像剖面8条,通过反演电阻率断面图,清晰识别出含水层顶底板埋深(80~150m)及厚度变化,与钻探结果吻合度达85%以上,有效降低了勘探成本。(2)卫星遥感解译地表水系特征。利用Landsat-8 OLI影像,通过归一化差异水体指数(NDWI)提取研究区河网密度及湖泊边界,结合DEM数据生成水流方向图,定量评估地表水对地下水的补给贡献率(15%~22%)。

1.4 地下水动态监测系统。构建覆盖全区的“监测井+自动传感器+云平台”动态监测网络,布设水位、水温监测井38眼,水质多参数仪(pH、EC、DO等)实时传输站点12处。监测频率设定为水位日测、水质旬测,结合雨量站数据,建立降水-入渗-水位响应模型,为水资源评价提供动态参数支撑。

2 研究区域水文地质条件分析

研究区域位于华北平原东部,属典型的山前冲洪积扇与滨海平原过渡地带,其复杂的地貌格局与气候条件共同塑造了独特的水文地质特征。系统分析区域地形地貌、含水层结构、补给排泄机制及水化学演化规律,是科学评价水资源承载力的基础。

2.1 自然地理概况。区域地势总体呈西北高、东南低,海拔从山区边缘的200m渐降至滨海平原的2~5m,依次发育山地、丘陵、山前倾斜平原及滨海低平原四大地貌单元。气候属暖温带半湿润季风气候,年均降水量620mm(1980~2020年系列),70%集中于6~9月;年均蒸发量1850mm,干旱指数达3.0,属水资源短缺地区。区内河流属海河水系,主要河流有滹沱河、子牙河等,受上游水库调控及降水年际变化影响,河流常年断流率超60%,地表水对地下水补给作用有限。

2.2 含水层系统结构。(1)孔隙含水层空间分布。孔隙含水

层广泛分布于山前至滨海平原,呈多层叠置结构。山前地带以粗砂、砾石为主,厚度20~50m,渗透系数(K)达 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/s,构成强富水区;中部冲积平原以中细砂为主,厚度15~30m, K 值降至 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s;滨海平原含水层渐变为粉细砂与亚砂土互层,厚度10~20m, K 值小于 10^{-3} cm/s。钻孔揭露显示,孔隙含水层顶板埋深由山前的30m增至滨海的60m,呈现“上细下粗”的二元结构。(2)岩溶裂隙含水层渗透性特征。岩溶含水层主要赋存于奥陶系灰岩中,分布于区域西部山区及山前地带。野外调查表明,岩溶发育程度具明显分带性:山区裸露区以溶洞、溶蚀裂隙为主,单井涌水量达 $1000 \sim 3000$ m³/d;山前覆盖区岩溶发育深度一般小于300m,以裂隙-溶孔为主,渗透系数0.1~5m/d,富水性中等。物探电阻率成像显示,岩溶含水层与孔隙含水层之间存在厚度5~15m的泥质隔水层,局部因断层切割导致水力联系增强。

2.3 地下水补给排泄条件。(1)大气降水入渗补给量计算。采用降水入渗系数法量化补给量,结合土壤质地、地形坡度及前期含水量等因素,分区确定入渗系数(α):山前砂壤土区 $\alpha=0.30 \sim 0.35$,中部粉砂壤土区 $\alpha=0.20 \sim 0.25$,滨海黏土区 $\alpha=0.10 \sim 0.15$ 。2020年降水量680mm条件下,全区降水入渗补给量为 2.1×10^8 m³,占降水总量的31%,其中山前地带贡献率达65%。(2)人工开采与侧向径流排泄关系。区域地下水排泄以人工开采为主,其次为侧向径流及蒸发排泄。山前地带因含水层富水性强,开采量达80万m³/d,形成面积1200km²的降落漏斗,导致地下水向开采中心径流;中部平原开采量50万m³/d,侧向径流排泄占比提升至25%;滨海平原因含水层薄、水位埋深浅,蒸发排泄成为主要方式。

2.4 水化学特征与演化规律。采集地下水样品86组,采用Piper三线图分析显示:山前地带水化学类型以HCO₃-Ca-Mg型为主,TDS<500mg/L,反映现代降水入渗补给特征;中部平原逐渐过渡为HCO₃-Cl-Na型,TDS升至800~1200mg/L,受蒸发浓缩与农业面源污染影响显著;滨海平原演变为Cl-Na型,TDS>1500mg/L,部分区域达3000mg/L,呈现海水入侵迹象。离子比例系数分析表明,Na⁺/Cl⁻摩尔比值由山前的0.6增至滨海的1.2,反映硅酸盐矿物风化与海水混合的双重作用。

3 水资源评价模型构建

水资源评价需兼顾水量、水质及承载力的动态特征,本研究构建“水量-水质-承载力”多维度耦合模型,通过方法对比优选、参数动态校准及多情景模拟,实现区域水资源系统的科学量化评估。

3.1 评价方法体系选择。水量平衡法与数值模拟法是地下水可开采量评价的两大主流方法。水量平衡法基于质量守恒原理,通过补给项(降水入渗、侧向径流)与排泄项(人工开采、蒸发)的代数计算确定水量盈亏,其优势在于计算简便、参数物理意义明确,但难以反映含水层非均质性及动态变化特征。数值模拟法通过离散化含水层系统,结合初始条件与边界条件求解偏微分方程,可模拟三维水流运动及溶质运移,适用于复杂地质条件下的长期动态预测,但对数据精度与计算资源要求较高。本研究以

数值模拟法为主框架,局部采用水量平衡法修正边界条件,形成“宏观平衡约束+微观过程模拟”的混合评价方法体系。

3.2 地下水可开采量计算。

3.2.1 解析法计算单井涌水量。针对山前强富水区,采用Dupuit公式计算完整井稳定涌水量:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - s)s}{\lg R - \lg r_0}$$

式中,K为渗透系数(m/d),H为含水层厚度(m),s为降深(m),R为影响半径(m),r₀为井径(m)。结合抽水试验数据(n=15组),确定山前地带K均值为8.5m/d,单井最大允许降深(s_{max})取15m,计算得单井涌水量为1200~1800m³/d。中部平原含水层变薄,采用Thiem公式修正,计算值降至600~1000m³/d。

3.2.2 MODFLOW模型率定与验证。构建覆盖全区(面积5800km²)的三维水文地质模型,垂向划分为3层(孔隙含水层、弱透水层、岩溶含水层),水平网格尺寸200m×200m。以2015~2018年为校准期,2019~2020年为验证期,通过PEST模块自动调参,优化渗透系数(K)、给水度(Sy)等关键参数。校准期水位模拟值与实测值均方根误差(RMSE)<0.8m,决定系数(R²)>0.85;验证期RMSE<1.2m,R²>0.78,模型可靠性满足评价要求。模拟显示,现状开采条件下,山前降落漏斗扩展速率达2.5km/a,需严格控制开采量。

3.3 水资源质量评价。采用模糊综合评价法量化水质等级,选取pH、TDS、NO₃⁻、Cl⁻等8项指标构建评价因子集,依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)划分5级隶属度函数。通过熵权法确定指标权重(如TDS权重0.28、NO₃⁻权重0.22),计算综合得分F:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i$$

式中,w_i为第i项指标权重,μ_i为其隶属度。评价结果显示:山前地带72%井点水质达Ⅱ类(F≥0.8),中部平原55%为Ⅲ类(0.6≤F<0.8),滨海平原80%为Ⅳ~Ⅴ类(F<0.6),主要污染因子为Cl⁻与TDS,需加强咸水入侵防控。

3.4 水资源承载力分析。(1)基于SD模型的供需平衡预测。构建系统动力学(SD)模型,集成人口、经济、水资源等子系统,设置常规开发、节水强化、生态保护3种情景。模拟显示:常规情景下,2030年需水量将达12.8×10⁸m³,超采量占比35%;节水情景通过提高农业灌溉效率(从0.55提升至0.65)与工业用水重复率(从75%提升至85%),需水量降至10.2×10⁸m³,超采量消除;生态情景进一步压缩农业用水比例(从65%降至55%),需水量稳定在9.8×10⁸m³,实现供需平衡。(2)生态需水量阈值确定。基于水量平衡法与生态水文模型,确定河流生态基流为多年平均径流量的10%,湖泊最小生态水位为常年平均水位的80%。结合地下水位埋深与植被生长关系,划定山前林地生态水位埋深阈值为4m,中部农田为3m,滨海湿地为2m。模拟表明,现状开采导致23%区域生

态水位低于阈值,需通过水源置换与人工回灌修复生态。

4 水资源开发利用对策

4.1 存在问题诊断。区域水资源开发面临结构性矛盾:山前地带因含水层富水性强,长期过量开采导致累计地面沉降量达1.2m,沉降速率0.06m/a,引发建筑物开裂、管线断裂等次生灾害;中部平原农业灌溉用水效率仅0.58,远低于全国平均水平,造成水资源浪费;滨海平原因海水入侵,30%浅层地下水Cl⁻浓度超标,生态功能严重退化。

4.2 可持续利用策略。(1)分区管控与动态配额制度。依据水文地质条件划分严格保护区(山前富水区)、限制开采区(中部过渡带)与禁止开采区(滨海湿地),建立地下水开采总量控制红线(年开采量≤8.5×10⁸m³)。引入物联网监测技术,实时调控各分区开采量,对超采区实施“以补定采”动态配额管理。(2)再生水回用与雨洪资源化。扩建污水处理厂中水回用系统,将再生水利用率从35%提升至60%,优先用于工业冷却与城市绿化;构建“海绵城市+河湖连通”工程体系,通过下沉式绿地、雨水调蓄池等设施截留雨洪,年可利用雨洪资源1.2×10⁸m³,缓解地下水补给压力。

4.3 管理机制创新。设计跨行政区水权交易平台,允许富水区向缺水区转让节余水量指标,交易收益按3:7比例分配至水源保护与生态修复;建立生态补偿基金,对实施轮作休耕、湿地修复的农户给予200元/亩·年的补贴,形成“保护者受益、使用者付费”的良性机制。

5 结论与展望

本研究通过构建“水量-水质-承载力”耦合模型,系统查明了区域水文地质结构特征,量化确定了含水层渗透系数、给水度等关键参数,揭示了地下水可开采量空间分布规律;基于模糊综合评价与SD模型,明确了水质等级与水资源承载力阈值,为分区管控提供了科学依据。

当前研究未充分耦合气候变化情景下的降水入渗补给动态变化,未来需融合CMIP6气候模型数据,构建“气候-水文-人类活动”多过程协同模拟系统,深化极端气候对水资源系统的影响机制研究,以提升评价结果的长期适应性。

参考文献

- [1]辛朋磊,刘森.基于层次分析法的中国水资源管理能力评价研究[J].水利水电快报,2023,44(04):39~44.
- [2]吴晓春,单俊萍,辛朋磊.基于层次分析法的南通市水资源管理能力评价[J].江苏水利,2024,(07):25~27+32.
- [3]高媛媛,王红瑞,许新宜,等.水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J].自然资源学报,2012,27(02):204~214.

作者简介:

秦学臻(1981--),男,汉族,山东省日照市人,大学本科,工程师,水工环地质。