

工程地质与地下水资源开发

秦学臻

山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队

DOI:10.12238/pe.v3i4.15102

[摘要] 山东日照作为沿海典型城市,其复杂的地质条件与水资源供需矛盾凸显了地下水资源开发的紧迫性。本研究以工程地质特征分析为核心,通过地质钻探、水文地质试验及MODFLOW数值模拟,系统评估了日照地区地下水赋存规律与可开采量。结果表明:孔隙水与裂隙水是主要供水水源,但海水入侵风险与地面沉降隐患限制了开发强度;提出“分区差异化开采+人工回灌补源”的可持续利用模式,为同类沿海地区水资源管理提供理论依据与技术参考。

[关键词] 工程地质; 地下水资源; 山东日照; 水文地质条件

中图分类号: TV211.1 **文献标识码:** A

Engineering Geology and Groundwater Resource Development

Xuezhen Qin

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

[Abstract] As a typical coastal city, Rizhao in Shandong Province highlights the urgency of groundwater resource development due to its complex geological conditions and the contradiction between water supply and demand. Based on the analysis of engineering geological characteristics, this study systematically assessed the groundwater occurrence law and mining output in Rizhao area through geological drilling, hydrogeological test and MODFLOW numerical simulation. The results indicate that pore water and fissure water are the main sources of water supply, but the risk of seawater intrusion and potential ground subsidence limit the development intensity; Propose a sustainable utilization model of "differentiated mining by zoning+artificial recharge and replenishment" to provide theoretical basis and technical reference for water resource management in similar coastal areas.

[Key words] Engineering geology; Groundwater resources; Rizhao, Shandong; hydrogeologic condition

1 引言

1.1 研究背景与意义

山东日照作为环渤海经济圈重要沿海城市,其地质条件兼具山地、平原与海岸带复合特征,断裂构造发育、岩土体类型多样导致地下水资源空间分布极不平衡。随着城市化进程加速及农业灌溉需求攀升,区域水资源供需矛盾日益突出,地下水开发利用已超65%,引发海水入侵与局部地面沉降等环境地质问题。系统解析工程地质特征与地下水赋存机制的耦合关系,科学评估开发潜力并提出适应性对策,对保障沿海城市水资源安全、支撑经济社会可持续发展具有重要战略意义。

1.2 研究现状与问题

国内外研究在工程地质分区、地下水数值模拟及可持续开发理论方面取得显著进展,但针对沿海断裂带发育区的专项研究仍显不足。现有日照地区研究多聚焦于单一水文地质参数分析,缺乏对地质构造-岩土体-地下水系统协同作用的深入探讨,

尤其在开发技术选择与地质灾害防控结合方面存在明显短板,难以支撑精细化水资源管理需求。

1.3 研究内容与方法

本研究以“地质条件-资源潜力-开发效应-可持续路径”为主线,开展地质构造解析、含水层三维建模、开采方案数值模拟及典型案例对比分析,综合运用地质勘探、水文地球化学测试与GIS空间分析技术,构建适用于沿海复杂地质区的地下水开发评估体系。

2 山东日照地区工程地质条件分析

2.1 区域地质概况

山东日照地处黄海之滨,位于华北板块东南缘,地形地貌呈现“三山两河一平原”的典型特征:北部为五莲山-九仙山花岗岩丘陵区,中部为傅疃河冲积平原,南部为沿海剥蚀平原与近岸海域。区域地质构造受郯庐断裂带控制,其NE向分支断裂贯穿全境,形成多组次级断裂网络。地层岩性纵向上呈现“上松下坚”

特征:表层为第四系全新统海相沉积层,中层为上更新统冲洪积层,基底为太古界胶南群变质岩及燕山期花岗岩,风化层厚度可达10-30m。

2.地质构造与活动性

研究区主要发育NE、NNE向断裂,其中日照断裂规模最大,走向NE30°-40°,倾向NW,倾角60°-75°,断裂带宽度200-500m,内部充填断层泥、构造角砾岩,导水性差异显著。郯庐断裂带活动性对区域应力场具有长期影响,历史地震记录显示,日照地区最大震级为5.1级,地震动峰值加速度为0.05g-0.10g,对应基本烈度VI-VII度。断裂活动性通过控制含水层边界条件、改变地下水径流路径,形成局部富水区与阻水屏障,对开发工程安全性提出防渗处理、动态监测等特殊要求。

2.3岩土体工程性质

现场试验表明,第四系粉细砂层渗透系数为 1.2×10^{-4} - 3.5×10^{-4} cm/s,压缩模量3.5-8.2MPa,属中低压缩性土;淤泥质土含水量达45%-60%,灵敏度 $St=4-7$,易引发井壁坍塌。基岩裂隙发育程度受岩性控制:花岗岩节理密度1-3条/m,张开度0.1-0.5mm,连通率60%-75%,形成网状裂隙含水层;变质岩裂隙多被绿泥石、方解石充填,透水性较弱。抽水试验显示,基岩区降深10m时单井涌水量仅50-200m³/d,需采用定向钻井技术增强导水通道。

2.4不良地质现象

海水入侵是沿海平原区首要地质灾害,2020年监测显示入侵前锋已抵达海岸带内陆3-5km,Cl⁻浓度超标区面积达28.7km²,主要因过量开采导致地下水位低于海平面。地面沉降则集中于傅疃河冲积平原,累计沉降量达300-800mm,年沉降速率8-15mm/a,与第四系松散层压缩密切相关。此外,局部岩溶发育区存在塌陷风险,2018年某工业园区因岩溶管道突水导致直径15m塌陷坑,直接经济损失超2000万元,凸显地质灾害防控的紧迫性。

3日照地区地下水资源特征与开发潜力

3.1地下水类型与分布

日照地区地下水类型呈现显著空间分异性:平原区以第四系孔隙水为主,主要赋存于傅疃河、两城河冲积扇及滨海相沉积层中,含水层厚度5-25m,单井涌水量300-1500m³/d,水质以HCO₃⁻-Ca型淡水为主,符合II类饮用水标准;丘陵区广泛分布基岩裂隙水,以太古界胶南群变质岩与燕山期花岗岩裂隙网络为储水空间,节理密度1-5条/m,导水系数0.1-1.0m²/d,单井涌水量50-300m³/d,局部断裂交汇处可达800m³/d,水质以HCO₃⁻-Ca-Mg型为主;岩溶水仅见于北部石灰岩分布区,溶蚀裂隙与溶洞构成主要储水构造,富水性极不均一,水质受岩溶作用影响呈现HCO₃⁻-Ca-Mg至SO₄²⁻-HCO₃⁻-Ca型过渡特征。

3.2地下水动态特征

水位动态呈现明显季节性波动:丰水期(7-9月)受降水入渗补给影响,平原区孔隙水位上升2-5m,形成以降水响应为主的快速波动型动态;枯水期(12-2月)水位下降1-3m,主要受蒸发排泄与人工开采控制。人类活动对动态的干预显著:农业灌溉期单井日开采量达500-1000m³,导致傅疃河冲积平原形成面积150km²的

降落漏斗,中心水位降幅达8-12m;工业集聚区(如日照开发区)长期开采使区域地下水位年均下降0.5-1.0m,引发局部地面沉降。同位素示踪显示,现代降水补给占比达70%-85%,反映地下水循环周期较短。

3.3资源量评估

采用水均衡法与数值模拟相结合的评估体系:降水入渗补给量通过降水入渗系数(平原区0.25-0.35,丘陵区0.10-0.20)计算,年补给总量达 2.8×10^8 m³;侧向径流补给量基于达西公式估算为 0.5×10^8 m³/a,总补给量 3.3×10^8 m³/a。运用MODFLOW构建三维非稳定流模型,设置200m×200m网格单元,模拟2010-2020年水位变化,校准后模型决定系数R²达0.92。水均衡分析表明,现状开采量(1.8×10^8 m³/a)已接近安全开采系数(0.8)对应的可开采量上限(2.1×10^8 m³/a),其中平原区孔隙水可开采系数0.65,丘陵区裂隙水0.50,岩溶水0.75。

3.4开发潜力与限制因素

开发潜力呈现“优势-挑战”并存特征:优势方面,沿海经济带(如岚山化工园区)年需水量超 0.5×10^8 m³,局部断裂富水区(如两城断裂带)单井产能可达2000m³/d,具备集中开发条件;丘陵区裂隙水水质优良(硝酸盐含量<5mg/L),可作为饮用水源地。挑战则集中于:①地质灾害风险,海水入侵前锋年均推进200-300m,Cl⁻浓度超标区面积较2000年扩大3.2倍;②工程成本高,基岩区钻井成本达2000-3000元/m,是平原区的2-3倍;③生态约束强化,15m等水位线包围区面积占比达18%,限制深层开采。建议实施“分区差异化开发”,平原区推行“浅层开采+人工回灌”,丘陵区采用“定向钻井+动态监测”,岩溶区建立“禁采区+应急水源地”的分级管理体系。

4工程地质条件对地下水开发的影响

4.1地质条件与开发方式选择

工程地质条件是决定地下水开发方式的核心要素。在松散沉积层分布区(如傅疃河冲积平原),第四系砂砾石层厚度达15-25m,渗透系数(1.2×10^{-3} - 3.5×10^{-3} cm/s)与含水层连续性优势显著,适宜采用管井群开采技术,单井设计深度控制在30-50m,配套滤水管与沉淀管可实现稳定出水。基岩区(如五莲山丘陵)则需定向钻井技术突破岩体各向异性限制,通过水平井或斜井截取裂隙网络,钻井角度需与主节理方向(NE30°-40°)呈15°-30°夹角以增强导水性。断裂带附近开发需双重防控:对导水断裂(如日照断裂宽200-500m),采用水泥灌浆帷幕(厚度≥1.0m)阻断渗漏通道;对阻水断裂,需布置监测井网(井距500-800m)实时追踪水位变化,预警突水风险。

4.2开发工程中的地质问题

井壁稳定性与土体工程性质密切相关:第四系粉细砂层(含水量35%-45%)在抽水降深超过8m时,易因有效应力增加引发流砂现象,导致井管周边土体颗粒流失(涌砂量达0.5-1.2m³/d);淤泥质土层(灵敏度 $St=5-7$)则因触变性产生井壁坍塌,需采用化学注浆(水泥-水玻璃双液浆)加固。海水入侵与地下水位下降形成恶性循环:沿海平原区过量开采使地下水位降至海平面

以下(-2.5m),形成压力差驱动海水以0.3-0.5m/d速度向内陆入侵, Cl^- 浓度超标区($>250\text{mg/L}$)面积年扩展率达8%-12%,同时咸淡水界面下移导致可利用淡水储量缩减30%-45%。

4.3 典型案例分析

日照开发区2015-2020年地下水集中开采引发地面沉降的教训表明:在冲积平原松散层区,单井开采量超过 $800\text{m}^3/\text{d}$ 时,3年内累计沉降量达620mm,建筑物倾斜率超规范限值2倍,修复成本超2.3亿元。其根源在于未考虑土体压缩性(压缩模量 $E_s=4.2\text{MPa}$)与降水漏斗叠加效应,后期通过回灌井(回灌量 $300\text{m}^3/\text{d}$)与限采政策(开采量削减40%)实现沉降速率降至 8mm/a 。相反,岚山农业灌溉区采用渗渠取水技术取得显著环境效益:沿傅疃河布置长800m的渗渠(坡降1%,滤料厚度0.8m),单日取水量达 5000m^3 ,较管井开采减少地下水位下降幅度65%,同时避免井群干扰引发的海水入侵,该模式已在同类地区推广应用,证明地质条件适配性开发技术可实现资源利用与生态保护双赢。

5 地下水资源可持续发展对策

地下水作为重要的水资源储备,其可持续发展对于保障区域水资源安全、维护生态平衡具有不可替代的作用。然而,随着城市化进程的加速和工农业生产的扩张,地下水资源的过度开采与污染问题日益凸显,亟需采取科学有效的对策以实现其可持续利用。本文将从技术优化、管理政策及生态保护与修复三个方面,系统阐述地下水资源可持续发展的策略。

5.1 技术优化措施

技术革新是提高地下水资源利用效率、减少开采负面影响的关键。首先,推广高效开采技术,如采用多级过滤井技术,通过多级过滤层有效拦截悬浮物,提升出水水质,同时减少对含水层的扰动;实施人工回灌工程,利用处理后的中水或雨水,通过回灌井补给地下水,维持地下水位稳定,防止地面沉降。其次,构建地质灾害监测预警系统,集成卫星遥感、地面监测站及物联网技术,实时监测地下水动态变化,预测并预警因过度开采可能引发的地质灾害,如地面塌陷、地裂缝等,为及时调整开采策略提供科学依据。

5.2 管理政策建议

科学的管理政策是地下水资源可持续发展的制度保障。一方面,应依据地下水资源的分布特征、补给条件及生态敏感性,合理划定地下水禁采区与限采区。例如,在沿海防护林带等生态脆弱区域设立禁采区,保护地下水资源不受过度开采影响,维护沿海生态系统的稳定。另一方面,建立水资源税与配额管理制度,通过经济手段调节地下水开采行为。对超过配额的开采行为征

收高额水资源税,增加开采成本,倒逼企业采取节水措施;同时,实施配额交易制度,允许企业间通过市场机制买卖地下水开采配额,促进水资源的优化配置。此外,加强地下水开采的审批与监管,确保所有开采活动均符合法律法规要求,严厉打击非法开采行为。

5.3 生态保护与修复

生态保护与修复是地下水资源可持续发展的重要环节。一方面,保障河道生态基流,通过科学调度水资源,确保河流在枯水期仍能维持一定的生态流量,为地下水提供稳定的补给源,同时维护河流生态系统的健康。另一方面,针对海水入侵区,采取生物措施与工程措施相结合的方式,种植耐盐植物构建生态屏障,减少海水对地下水的直接侵蚀,同时通过植物的蒸腾作用促进地下水循环,改善土壤盐渍化状况。此外,实施湿地恢复与保护工程,利用湿地的自然净化功能,净化受污染的地下水,提升地下水水质,为生物提供栖息地,增强生态系统的服务功能。

6 结论与展望

本研究针对日照地区地下水开发利用展开深入探讨,得出以下主要结论:鉴于日照地区地质条件复杂多样,地下水开发必须遵循“因地制宜”原则,结合区域地质特征制定科学合理的开发方案。同时,可持续发展要求在经济需求与生态保护之间寻求平衡,确保地下水资源的长期利用与生态系统的健康稳定。然而,本研究仍存在一定局限性,如长期动态监测数据的缺乏,制约了数值模型验证的准确性。未来需加强地下水动态监测网络建设,积累长期数据,以提升模型预测的可靠性。此外,气候变化对地下水补给的影响机制尚不明确,需进一步深入研究,为地下水资源的可持续发展提供更为全面的科学依据。

[参考文献]

- [1]李少飞,魏啟杨,李锡均.岩溶地下水开发利用及环境保护地质工程研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S1):406-409.
- [2]孙亚.滨海地区地下水资源开发利用对生态环境的影响研究[D].大连理工大学,2021.
- [3]杨仁忠,姜赟赟,廉德军,等.泰安市高新区水资源调查评价[J].西部资源,2020,(05):97-98+102.
- [4]颜久印,马建锋.地下水开发引起的环境问题与治理[J].环境与发展,2020,32(04):69-70.

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。