

4.2 塔里木盆地南缘断裂对潜水补给的制约

塔里木盆地南缘断裂对潜水补给的制约作用表现为断裂结构对降水入渗过程的直接控制,断裂破碎带的宽度与倾角共同决定了其垂向导水性能的效益,只有当破碎带宽度超过八十米且倾角小于四十五度时才能形成高效的潜水垂向补给通道,这一点凭借多点连续水位监测数据得到证实,暴雨后断裂带内潜水水位在七十二小时内响应峰值可达零点八至一点二米,而邻近完整地层区的响应则明显滞后且振幅微弱,同位素示踪结果更进一步排除了区域地下水系统或冰川融水的影响,确认补给水源完全来自本地降水,断裂活动性的增强可能凭借压密效应减少含水层渗透系数,继而削弱其补给能力,该类制约关系使得断裂带变成调控山前平原潜水补给空间异质性的核心地质边界^[3]。

4.3 天山北麓前陆拗陷区承压水系统演化

天山北麓前陆拗陷区承压水系统的演化过程受到构造沉降速率差异与断层垂向导水性分异的联合控制,构造沉降驱动含水层压缩释水,断层带跟完整岩体之间高达数个数量级的导水率差异塑造了承压水头冗杂的空间分异格局,近年的监测数据显示承压水位年均下降速率跟同期 InSAR 测得的构造加载加速期表现高度同步性,钻孔剖面对比更進一步显示含水层顶板埋深在山前逆冲楔体前展式生长背景下发生明显变浅,水化学同位素定年结果则说明现今承压水年龄主要集中于末次冰消期以来构造沉降加速阶段,证实了构造活动对地下水系统演化的长期控制作用,活动断层附近开采井水位衰减速率明显高于远场区域的现象,直接印证了断层活动性对地下水动态的强烈扰动。

5 地质构造活动对地下水动态的长期影响

5.1 地震活动诱发的水位异常现象

地震活动可诱发明显的地下水动态响应。2023-2025 年新疆地区多次中强震记录显示,距震中 60 公里内的观测井水位异常响应率高达 87%,异常类型以阶跃型为主(76%)。譬如,2024 年阿图什 6.4 级地震致使 31 公里外的阿图什站水位阶跃上升 1.07 米,创近十年纪录,研究证实其与 NW 向喀什拗陷断裂活化直接相关。异常多始于 P 波到达后、S 波抵达前,同震水位脉冲频谱(4-8 Hz)跟浅层介质共振频率吻合,说明其受控于地震波传播与含水层-构造耦合作用。

5.2 构造应力场变化对含水层渗透性的调控

构造应力场的变化直接调控含水层渗透性能,应力主

方向的旋转或应力差值的改变可以触发渗透性的阶跃式响应,该类响应一般存在数小时至十八个月的滞后时间,区域监测数据显示超过四成的构造敏感区监测井出现渗透性异常波动,该类波动大多与活动断裂的应力加载事件在时空上高度吻合,应力场增强可能致使逆冲断层带垂向渗透率明显下降,而伴生的张扭性次级裂隙又使得局部水平渗透率得到加强,应力旋转还会诱发含水层微裂隙的定向重排,继而激化渗透性的各向异性,地震活动引发的区域应力扰动可以开启深部越流通道,致使单井涌水量出现瞬时增加,走滑断裂带的应力卸荷区则可能形成渗透系数极高的局部“渗透窗”,但其影响范围一般局限于断裂带附近狭窄区域^[4]。

6 结论

新疆地区地下水系统跟地质构造之间存在严密的耦合关系,断裂带的空间展布、活动样式及断层泥物理性质共同决定了含水层系统的分割格局跟水文边界属性,阿尔金、天山北麓与博罗科努等主干断裂不光控制区域地下水补给一径流一排泄途径,更借助垂向越流通道或阻水屏障作用引发水头突变与水化学类型跃变,盆地一山地构造耦合体系则从根本上塑造了地下水赋存空间跟运移方向,准噶尔盆地南缘逆冲断层带形成局部富水区并诱发上下盘水化学分异,塔里木盆地北缘走滑一逆冲复合构造将含水层切割为多个独立水动力单元,吐鲁番盆地伸展构造则发育弥散型含水结构,新构造运动驱动的地层变形直接调控含水层渗透性演化跟承压水封存能力,地震波传播与构造应力场动态变化可触发含水层渗透率阶跃式响应,水位异常与断层活化事件在时空上高度吻合,构造活动速率、应力方向旋转及差应力变化均对地下水动态产生可识别、可量化的长期调制效应。

参考文献

- [1] 李槌,李随民,李佑国,等.不同地质建造单元地下水化学特征及演化过程分析——以西昌地区为例[J].河北地质大学学报,2025,48(06):65-75.
- [2] 张永安,郑力,杨乐,等.中梁山双隧道工程水文地质数值模拟应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(12):89-95.
- [3] 赫洪哲,周千惠.佛山某地铁线路高架区段工程地质分析与评价[J].工程技术研究,2025,10(22):47-49.
- [4] 朱昱.水工环地质监测技术在地质灾害治理中的应用研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(12):179-181.

Characteristics of Groundwater Water Quality Pollution and Its Control Technology

Hongtu Niu

China Power Construction Group Northwest Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Groundwater quality pollution has become a serious global environmental issue, particularly in the Xinjiang region, where the problem is exacerbated by its unique geographical and climatic conditions. The main sources of groundwater pollution are agriculture, industrial activities, and improper waste disposal. Groundwater pollution in Xinjiang is characterized by severe contamination from heavy metals, pesticide residues, and organic pollutants, especially in agricultural hubs and mining areas, where water quality issues are most prominent. Therefore, controlling groundwater quality pollution is not only a critical task for environmental protection but also a necessary measure to ensure the sustainable development of society. By strengthening source control, improving water resource management, and promoting the innovation and application of pollution control technologies, the impact of pollutants on groundwater can be effectively reduced, enhancing water quality protection capabilities and providing scientific support for the sustainable use of regional water resources.

Keywords

groundwater; water quality pollution; xinjiang region; heavy metal pollution; pollution control

地下水水质污染特征及其控制技术

牛宏图

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

地下水水质污染已成为全球范围内严重的环境问题,尤其是在新疆地区,由于其特殊的地理与气候条件,地下水污染问题愈加突出。农业、工业活动、以及人类不当的废弃物处理等是地下水污染的主要来源。新疆地区的地下水污染特征表现为重金属、农药残留以及有机污染物的严重污染,尤其是在一些农业集中地区和矿业资源开采区域,水质问题尤为显著。因此,控制地下水水质污染不仅是环境保护的重要任务,也是确保社会可持续发展的必要举措。通过加强源头治理、改善水资源管理、推动污染治理技术的创新与应用,可以有效减少污染物对地下水的影 响,提升水质保障能力,为区域的水资源可持续利用提供科学支持。

关键词

地下水; 水质污染; 新疆地区; 重金属污染; 污染控制

1 引言

新疆地区是中国面积最大的省区,地理上分为多种生态环境,包括干旱、半干旱和湿润地区。随着经济的快速发展和人口的逐渐增加,水资源的需求急剧增加,地下水成为了重要的饮用水源。近年来,由于农业灌溉、矿产资源开采以及工业活动的影响,地下水水质问题日益突出。尤其是在一些缺乏有效水资源管理的地区,水质污染问题尤为严重。污染物的渗透和积累导致了地下水的污染,威胁着区域水资源的安全。尤其是重金属污染和农药残留问题,已经成为影响地下水质量的主要因素。新疆独特的地理和气候条件使得

污染物在地下水中的存留时间较长,治理难度较大。为了应对这一问题,深入研究污染源及污染物特征,探索高效的控制技术,已成为当前亟待解决的关键课题。因此,本文将探讨新疆地区地下水污染的主要特征及其控制技术,为制定有效的污染治理方案提供理论依据。

2 地下水水质污染的主要来源与迁移机制

2.1 工业活动排放的污染源特征

工业活动排放构成地下水污染的重点来源,其污染物类型表现重金属、持久性有机物跟新兴关注物并存的繁复特征,电镀等行业地下水中六价格的检出率与超标现象突出,氯代溶剂则在有机污染实例中占据主导,全氟化合物等新兴污染物在化工集聚区的检出态势亦不能忽视。污染物的空间分布受场地类型明显影响,石化类场地污染羽的扩散范围一

【作者简介】牛宏图(1991-),男,中国甘肃会宁人,硕士,工程师,从事地质勘察研究。

般大于电镀跟印染类场地，大量重污染场地的污染物已穿透浅层含水层底板并向下迁移至承压含水层。污染物的迁移过程受地质介质跟地球化学条件严格制约，裂隙介质中的优先流途径极大地加速了溶质运移，非水相液体在细粒土层中的实际下渗速率远超理论达西流速，而微生物介导的还原转化等过程则强烈依赖于地下水的 pH 与氧化还原环境。污染源强的量化参数显示，点源泄漏通量跟区域累积负荷共同塑造了地下水污染的空间格局，污染物的自然衰减速率在现场复杂水文地球化学背景下的实际表现总是低于实验室理想条件下的估值。

2.2 农业面源污染的输入路径

农业面源污染借助多种途径进入地下水系统，田间地表径流携带的硝酸盐与农药在特定降雨与土壤条件下发生垂向入渗，农田地下排水系统则构成污染物向浅层含水层侧向迁移的高效通道，大水漫灌引发的活塞流跟优先流明显加速了溶质向深部的运移，畜禽粪污还田后的淋溶过程借助生物通道将抗生素跟重金属向下输送，农膜残留产生的微塑料更可作为污染物载体在土壤孔隙中发生共迁移，上述途径的贡献率受控于灌溉管理、土壤性质及生物活动等多重因子，其迁移机制大多超越传统达西流的描述范围。

2.3 污染物在含水层中的迁移转化过程

污染物在含水层中的迁移转化受多过程协同控制。高流速下机械弥散主导，非均质性引发羽流分叉，传统对流-弥散模型需引入分数阶项以增进预测精度。氧化还原条件决定化学转化途径，Eh 低于 -100 mV 时 Cr(VI) 可在沉积物界面凭借暗反应快速还原，速率常数达 0.014 h⁻¹。微生物活性驱动生物转化，Dechloromonas 属丰度上升使 TCE 脱氯周期缩短至 112 天。胶体媒介明显增强重金属与有机污染物的迁移能力，腐殖质胶体可使 Cd²⁺ 迁移速率增加 4.3 倍。多尺度非均质结构与生物地球化学过程的动态耦合变成准确刻画污染物归趋的核心^[1]。

现代监测技术融合高密度电阻率成像跟宏基因组分析，实现了硝酸盐还原热点区厘米级定位，为原位修复给予空间靶向依据。松辽盆地与黄河下游的实证研究显示了乳酸钠刺激下功能菌群的快速响应及微塑料对 Cr(VI) 穿透行为的助推效应。尽管如此，鄂尔多斯白垩系及西南岩溶含水层中 PFAS 的生物降解潜力依旧缺乏实测数据，制约了风险评估的准确性。污染物在含水层中迁移转化的多过程耦合路径如图 2.1 所示。

3 新疆地区典型污染物的分布特征与健康风险

3.1 无机污染物的区域分布规律

新疆地区的地下水中，无机污染物的分布特征呈现明显的区域性差异。以重金属污染为例，尤其是在农业灌溉较为集中的地区，铅、镉、砷等重金属的浓度较高。这些无机污染物通常通过土壤渗透至地下水中，受到矿产开采、化肥和农药使用等活动的影响。新疆的部分矿区和工业区周边，由于缺乏有效的废水处理和资源回收，地下水中的重金属污

染问题尤为突出，污染物的浓度远远超出了国家饮用水标准。此外，由于新疆地域广阔，地下水的补给条件差异较大，部分干旱半干旱地区的水质更易受到自然盐渍化的影响，水中钠、硫酸盐等无机盐含量较高，进一步加剧了地下水的污染问题。总体来看，无机污染物的分布受区域地理、气候、工业发展以及农业活动等多重因素的综合影响，呈现出明显的空间分布特点。因此，对于新疆地区的地下水污染防治，需要结合具体地区的实际情况，制定有针对性的治理策略。

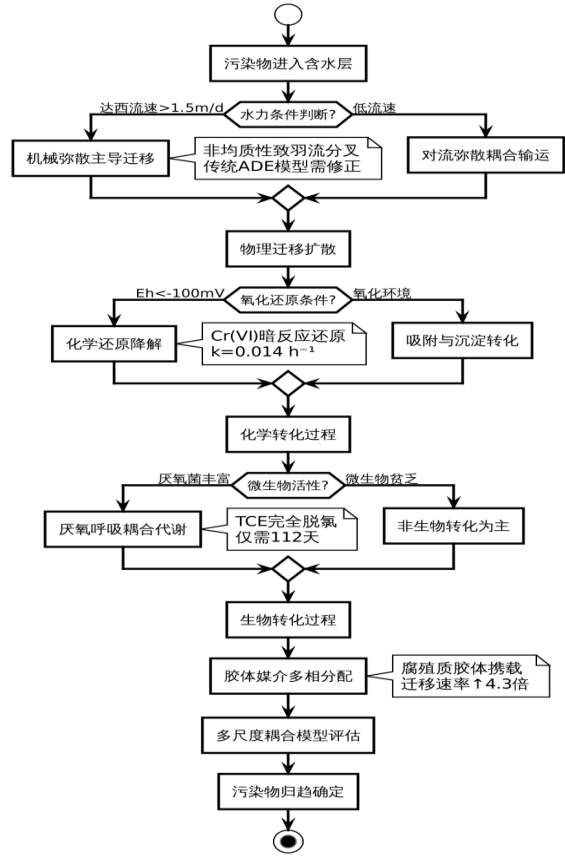


图 2.1 污染物在含水层中迁移转化的多过程耦合路径

3.2 有机污染物的赋存形态与检出频率

有机污染物在新疆地下水中的存在形式较为复杂，主要包括农药、化肥及工业废弃物中产生的有机化合物。由于农业是新疆经济的重要支柱，农药和化肥的广泛使用导致了有机污染物在地下水中的富集。尤其是在一些水资源匮乏的干旱地区，灌溉过程中农药和化肥的残留物未得到有效分解或降解，直接进入地下水系统，造成污染。此外，一些工业活动，尤其是化工、纺织和矿业产业的废水排放，也对地下水中的有机污染物产生了负面影响。这些污染物以有机化学物质的形态在地下水存在，主要包括苯类、酮类、酯类等有机溶剂及其衍生物。检测数据显示，某些区域的地下水中有有机污染物的检出频率较高，尤其是农田灌溉区和工业集中区，污染情况尤为严重。尽管部分污染物的浓度较低，但长期累积对生态系统和居民健康的潜在威胁仍不容忽视。针对有机污染物的治理，需要加强源头控制，并且结合先进的水