

地下水环境监测技术与水质安全评估方法研究

苏龙嘎 胡俊梅

内蒙古自治区阿拉善盟生态环境监测监控站

DOI:10.32629/eep.v8i11.2960

[摘要] 地下水作为重要的淡水资源,在保障居民生活用水、支撑经济社会发展和维持生态平衡方面发挥着不可替代的作用。随着工业化进程加快和人类活动加剧,地下水污染问题日益突出,科学有效的地下水环境监测与水质安全评估成为地下水污染防治的关键环节。本文系统梳理了地下水环境监测技术的发展现状,重点分析了自动化监测系统、传感器技术、在线监测设备等现代监测手段的应用进展;同时,深入探讨了地下水水质安全评估方法体系,包括单因子指数法、综合污染指数法、层次分析法、灰色关联分析法等多种评价方法的原理、特点及适用性。基于当前监测技术和评估方法存在的问题,提出了未来地下水环境监测与水质安全评估的发展方向,为地下水资源的可持续利用和生态环境保护提供科学依据。

[关键词] 地下水; 环境监测; 水质评估; 监测技术; 评价方法

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A

Study on Groundwater Environmental Monitoring Technology and Water Quality Safety Assessment Method

Longga Su Junmei Hu

Alxa League Ecological Environment Monitoring and Control Station

[Abstract] As a critical freshwater resource, groundwater plays an irreplaceable role in guaranteeing residents' domestic water supply, supporting economic and social development, and maintaining ecological balance. With the acceleration of industrialization and the intensification of human activities, groundwater pollution has become an increasingly prominent issue. Scientific and effective groundwater environmental monitoring and water quality safety assessment have emerged as key components of groundwater pollution prevention and control. This paper systematically sorts out the current development status of groundwater environmental monitoring technologies, with a focus on the application progress of modern monitoring means such as automated monitoring systems, sensor technologies, and online monitoring devices. Meanwhile, it deeply explores the groundwater water quality safety assessment method system, including the principles, characteristics, and applicability of various evaluation methods such as the Single Factor Index Method, Comprehensive Pollution Index Method, Analytic Hierarchy Process, and Grey Relational Analysis Method. Based on the existing problems in current monitoring technologies and assessment methods, this paper proposes future development directions for groundwater environmental monitoring and water quality safety assessment, providing a scientific basis for the sustainable utilization of groundwater resources and ecological environmental protection.

[Key words] Groundwater; Environmental Monitoring; Water Quality Assessment Monitoring Technology; Evaluation Method

引言

地下水是我国北方许多地区和城市主要的饮用水源,同时也是维系河流、湖泊、湿地生态健康的关键因素。然而,随着工业化和城镇化的快速发展,工业废水、生活污水、农业面源污染以及固体废弃物的渗滤液等,正通过包气带对地下水环境构成严重威胁^[1]。地下水污染具有隐蔽性、滞后性、难逆转性等特

点,一旦污染,治理成本极高且周期漫长。因此,构建科学高效的地下水环境监测网络,并建立精准可靠的水质安全评估方法体系,对于及时掌握地下水环境质量状况、预警污染风险、保障饮用水安全及实施有效监管具有至关重要的意义。本文旨在系统梳理当前主流的地下水监测技术与水质评估方法,并探讨其未来发展方向。

1 地下水环境监测技术发展现状

有效的监测是准确评估的基础。现代地下水监测已从分散、滞后的手动采样向自动化、实时化、立体化的方向发展。

1.1 监测网络优化设计

监测点的布设直接决定监测数据的代表性。应遵循“尺度-目标”原则,综合考虑水文地质条件、污染源分布(工业区、垃圾填埋场、农田等)以及地下水径流方向,采用系统网格法、判断布点法或理论模型辅助法(如GMS软件)进行优化设计,形成能控制区域背景值、污染羽空间分布和重点保护区状况的三维监测网络。

1.2 主要监测技术方法

传统采样-实验室分析技术:通过建设监测井,使用贝勒管或一次性采样泵采集水样,送至实验室利用色谱、质谱、原子吸收等精密仪器进行分析^[2]。该方法数据准确度高,是定量的“金标准”,但成本高、周期长,难以反映水质的动态变化。

原位实时监测技术:在监测井中安装多参数传感器,可连续、自动监测水温、pH、电导率、溶解氧、氧化还原电位等物理化学指标,甚至包括硝酸盐、氨氮等特定化学指标。该技术能捕捉水质的瞬时和周期性变化,是实现预警的关键。

地球物理探测技术:如电阻率法、探地雷达等,可非侵入性地探测污染羽的宏观分布范围、渗漏通道等,为大范围筛查和监测网优化提供指导。

遥感与同位素技术:卫星遥感可间接监测与地下水变化相关的地表沉降;环境同位素技术有助于识别污染来源和判定地下水年龄与补给途径。

1.3 “空-天-地-井”一体化监测体系

未来的趋势是整合上述技术,构建一个立体化的综合监测体系。即利用卫星遥感进行大范围筛查,利用地球物理进行重点区域详查,利用监测井和原位传感器进行精准定位与实时监控,形成从宏观到微观、从静态到动态的完整数据链。

2 地下水水质安全评估方法

获取监测数据后,需要采用科学的评估方法对水质安全状况进行综合评判。

2.1 常规水质指数法

以国家《地下水质量标准》为基准,通过计算内梅罗指数、水质标识指数等,对水质进行分级评价(如I至V类)。该方法简单直观,便于管理,但属于“事后”评价,难以反映复合污染和健康风险。

2.2 多元统计分析方法

利用主成分分析、聚类分析等统计方法,从大量的监测数据中提取主要污染因子,识别污染来源(如工业源、农业源、生活源),并划分具有相似水质特征的区域。该方法能从复杂数据中揭示内在规律,为污染溯源和针对性治理提供依据。

2.3 健康风险评估模型

该方法重点关注地下水作为饮用水源时,污染物通过饮水、皮肤接触等途径对人体健康造成的潜在危害^[3]。以美国EPA的标

准方法为例,其核心步骤包括:

危害识别:确定地下水中存在的关键有毒有害污染物(如重金属、挥发性有机物)。

暴露评估:评估人群(特别是敏感人群)对污染物的暴露浓度、频率和周期。

毒性评估:确定污染物的致癌斜率因子和参考剂量等毒性参数。

风险表征:计算致癌风险和非致癌危害商。最终量化风险值,为确定修复目标和优先控制污染物提供科学依据。这是目前国际上评估水质安全性的主流和精细化方法。

2.4 地下水脆弱性评价

脆弱性评价并非直接评价水质,而是评估地下水系统本身抵御污染的内在能力。常用DRASTIC模型,综合考虑地下水埋深、净补给量、含水层介质、土壤类型、地形、包气带影响和含水层水力传导度七个因子,绘制区域脆弱性分区图。该评价具有前瞻性,可为土地利用规划、水源保护区划分等预防性管理措施提供支持。

3 地下水环境监测与水质评估存在的问题

3.1 监测技术存在的问题

3.1.1 区域背景值监测点欠缺。现有监测点多围绕“双源”(地下水型饮用水水源地、重点地下水污染源)布设,上游对照井仅能代表小范围对照值,无法满足区域背景值的监测需求。

3.1.2 监测井设计前瞻性不足。新建监测井功能提升有限,未预留新型传感器、物联网设备安装空间及二维码信息载体区域;布点未统筹周边供电供网条件,也未与土壤、地表水等生态环境监测点位协同规划。

3.1.3 水质在线监测设备不成熟。现有设备多仅监测物理指标,覆盖污染物种类少,精度低且易受干扰;设备成本高、损坏率高,维护难度大,自动洗井、取样等配套设备亟待升级。

3.1.4 监管平台建设薄弱。平台缺乏统一的标准化数据格式、共享协议与接口,数据整合交换困难;数据共享存在安全与隐私保护风险;数据挖掘、深度分析等应用服务能力不足。

3.2 水质评估存在的问题

3.2.1 背景值确定困难。受人类活动普遍影响,传统概念中未受污染的天然背景值已无法获取;采用对照值替代的方案,又受区域历史资料完整性、指标数量及数据质量制约。

3.2.2 评价方法科学性不足。传统层次分析法的判断矩阵易受人为主观干扰,多指标场景下运算量大,评价结果易出现偏差,可能夸大常规化学指标危害,或掩盖有毒有机物等对人体健康的高风险。

3.2.3 天然劣质水与污染水区分困难。受背景值概念局限,现有评价未有效区分天然地质成因的劣质水与人为污染水,易夸大污染程度,给管理决策带来困扰。

3.2.4 人类活动影响识别不足。传统评价仅笼统将人类活动归为水质恶化原因,未开展针对性的识别与量化,制约了对地下水污染机理和影响的深度认知。

4 地下水环境监测与水质评估发展趋势

4.1 监测技术发展趋势

4.1.1 智能化与自动化。地下水污染监测技术正朝着智能化、自动化和实时化方向发展。智能化是指利用人工智能、大数据和物联网等技术,实现对地下水污染的智能监测和分析,提高监测效率和准确性^[4]。自动化是指利用自动化设备和仪器来完成监测任务,减少人工干预,提高监测效率。实时化是指利用传感器和通信技术,实现对地下水污染的实时监测,及时发现和应对污染事件。

4.1.2 微型化与可移动化。地下水污染监测技术正朝着微型化和可移动化方向发展。微型化是指将监测设备做得更小更轻,方便携带和使用,降低监测成本。可移动化是指将监测设备设计成可移动的,以便在不同地点进行监测,提高监测灵活性。

4.1.3 非侵入性与无损检测。地下水污染监测技术正朝着非侵入性和无损检测方向发展。非侵入性是指不对地下水造成破坏,如利用地球物理法、同位素技术等来获取地下水污染信息。无损检测是指不损坏地下水样品,如利用光谱分析法、质谱分析法等来获取地下水污染信息。

4.1.4 高灵敏度与高选择性。地下水污染监测技术正朝着高灵敏度和高选择性方向发展。高灵敏度是指能够检测出非常低浓度的污染物,如利用纳米材料、生物传感器等技术来提高监测灵敏度。高选择性是指能够区分不同污染物,如利用分子印迹技术、免疫分析技术等来提高监测选择性。

4.2 水质评估方法创新

4.2.1 “指标分类评价-组合表达”思路。针对不同类型指标具有不同指示意义的问题,提出了“指标分类评价-组合表达”的水质及污染综合评价思路。该思路的关键是分类和组合表达,分类解决了不同性质和危害指标之间的差异性,组合表达是介于单指标评价和综合评价的折中表达方式。这种方法相对减少了信息丢失,简单又能较为准确地反映水质总体状况。

4.2.2 视背景值概念。针对传统背景值无法获取的问题,提出了“视背景值”的概念。视背景值是指地下水在天然状态下叠加人类正常活动影响所形成的各种水化学组分特征含量、变化范围、比例关系等,它反映了地下水中各水化学要素随自然环境及人类正常活动影响条件下演化和发展的过程及特征^[5]。视背景值概念的关键在于将人类正常活动对地下水水化学特征和水质的影响纳入背景值的范畴,而将那些对地下水水质影响异常的、突出的且不符合地下水污染防治策略以及法律法规的人类活动作为背景值范围之外的异常。

4.2.3 劣质水和劣变水评价。提出了劣质水和劣变水的概念及评价思路。劣质水是指天然地质成因导致水质不符合饮用水标准的地下水;劣变水是指人类正常活动导致水质发生变化但仍可接受的地下水。通过区分天然劣质水和污染水,可以更准确地评估地下水污染状况,避免夸大污染程度。

4.2.4 人类活动影响识别。对人类活动影响的识别和量化,进一步推动了对输入型污染、诱导型水质恶化以及水化学场变化所引起的各种水质问题的认识。这有助于判断水质演化趋势、制定污染防控措施、分类解决水质问题。

4.3 智慧监测平台建设

4.3.1 数据智慧化管理。构建监测数据智慧化管理平台,运用孤立森林算法等AI技术对数据进行自动清洗和质控,确保数据的真实可靠。平台集成AI机器学习预测技术,能够基于历史数据和环境因素,对地下水水质变化趋势进行预测,提前发出风险预警,将被动应对转变为主动防控。

4.3.2 污染源溯技术。集成模拟植物生长算法与放射性/稳定同位素源解析等先进技术,能够精准甄别不同含水层的污染状况,显著提升污染源溯的分辨率和精准度,为管理部门采取针对性治理措施提供坚实的科学依据。

4.3.3 多网融合应用。将国家级地下水环境监测网与地表水监测网、大气污染监测网、土壤监测网等进行多网融合。地下水监测与地表水监测网络的融合可以加强对地表水和地下水转换和污染迁移的认识。大气中污染物的迁移、扩散和沉降会对地下水水质及保护产生重要影响,二者网络融合便于全面深入地了解地下水污染机理和影响。

5 结论与建议

健全的地下水环境监测技术体系是准确掌握水质状况的“感知神经”,而科学的水质安全评估方法则是进行风险研判和管理决策的“大脑”。二者相辅相成,共同构成了地下水环境保护与管理的技术基石。未来,应着力推动监测技术的自动化、智能化升级,并深化多种评估方法的融合创新,特别是加强基于健康风险的动态评估模型研究,从而为我国地下水资源的可持续利用与安全保障提供更加有力的科技支撑。

[参考文献]

[1]楼朝胜,陈金汉,郑帅帅.地下水和土壤环境监测中存在的污染问题与对策研究[J].中国战略新兴产业,2025,(33):89-91.

[2]王长明,张强,罗浩,等.土壤与地下水环境管理问题及对策研究[J].山西化工,2023,43(09):189-190+202.

[3]曲延光,温宝玉,韩京龙,等.地下水超采区埋深控制指标确定方法的探讨[J].吉林水利,2024,(08):28-32.

[4]Barman J,Biswas B,Soren L D D.Groundwater trend analysis and regional groundwater drought assessment of a semi-arid region of Rajasthan, India[J].Environment,Development and Sustainability,2023,27(2):1-25.

[5]靳孟贵,张结,张志鑫,等.地下水硫酸盐溯源的进展、问题和发展趋势[J].地质科技通报,2022,41(05):160-171.

作者简介:

苏龙嘎(1982--),女,蒙古族,内蒙古阿拉善人,本科,阿拉善盟生态环境监测监控站,中级,研究方向:生态环境。