

水文地球化学特征在地下水污染源识别中的应用

王金金

河南省地质局地质灾害防治中心，河南 郑州 450014

DOI:10.61369/ETQM.2025070020

摘要： 地下水污染对生态环境和人类健康构成严重威胁，精准识别污染源是实施有效治理的前提。水文地球化学特征包含着丰富的污染源信息，通过对水体化学组分、同位素等特征的深入剖析，能够建立可靠的污染识别模型，进而追踪污染物迁移转化规律。利用该特征识别地下水污染源，为地下水污染防控提供科学且有效的依据，助力实现地下水环境精准治理与生态修复，对保障地下水资源安全意义深远。

关键词： 水文地球化学；地下水污染；污染源识别；化学组分；同位素

Application of Hydrogeochemical Characteristics in Groundwater Pollution Source Identification

Wang Jinjin

Geological Hazard Prevention and Control Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450014

Abstract： Groundwater pollution poses a serious threat to the ecological environment and human health, and accurate identification of pollution sources is the premise of effective governance. Hydrogeochemical characteristics contain abundant information about pollution sources. Through in-depth analysis of chemical components and isotopes of water, a reliable pollution identification model can be established, and then the migration and transformation law of pollutants can be tracked. Using this feature to identify groundwater pollution sources provides a scientific and effective basis for the prevention and control of groundwater pollution, helps to achieve precise management and ecological restoration of groundwater environment, and has far-reaching significance for ensuring the safety of groundwater resources.

Keywords： hydrogeochemistry; groundwater pollution; pollution source identification; chemical composition; isotope

引言

地下水作为重要的水资源，在维持生态平衡和保障人类用水方面发挥着关键作用。然而，随着工业化、城镇化进程加快，地下水污染问题愈发严峻。水文地球化学特征与地下水污染过程紧密相连，其蕴含的化学和同位素信息如同污染源的“独特指纹”。深入研究并应用这些特征，有助于突破现有技术瓶颈，提升污染源识别的精准度，为地下水污染防治提供强有力的技术支撑。

一、污染特征关联

地下水污染与水文地球化学特征之间存在着紧密且复杂的联系。不同类型的污染源排放的污染物进入地下水系统后，会打破原有水体的化学平衡，改变其化学组成，从而形成具有特异性的化学特征。工业活动排放的废水中，常含有大量重金属元素如铅、镉、汞等，这些污染物进入地下水后，会使相应重金属元素的含量显著升高，同时改变水体中阴阳离子的比例关系。生活污水则富含氮、磷等营养物质，会导致地下水中氨氮、磷酸盐等含

量增加，引发水体富营养化问题。农业生产中大量使用的农药、化肥，其所含的有机化合物和无机离子也会渗入地下水中，影响地下水的化学性质。

稳定同位素和放射性同位素特征在地下水污染源识别领域发挥着至关重要的作用，具有不可忽视的价值。稳定同位素中的氢、氧同位素，其具体组成极易受到各类环境因素以及物质来源的显著影响。举例来说，不同来源的水，诸如大气降水、地表水，或是来自深层岩石孔隙中的水源，它们各自拥有独特的氢氧同位素比值。通过运用先进的质谱分析技术，精准测定地下水中

氢氧同位素的组成，研究人员便能够抽丝剥茧，追溯水的起源，明确其究竟是源于大气降水历经地表径流与入渗形成，还是与地表水存在水力联系，亦或是其他特殊水源补给所致。

放射性同位素如碳 - 14、氚等，在该领域也有独特应用。碳 - 14 半衰期较长，可用于测定年代较为久远的地下水年龄；氚则因半衰期相对较短，更适用于测定较新的地下水年龄。借助这些放射性同位素，我们能够清晰了解污染物在地下水中的滞留时间和迁移历史。当污染物进入地下水系统时，其携带的同位素特征会与地下水原有的同位素特征相互作用，产生一系列复杂的物理、化学变化。污染物中的特定同位素可能会参与化学反应，改变地下水原有同位素的相对丰度。

地下水所处的地质环境也会在水文地球化学特征产生影响。不同的岩石类型、土壤性质会与地下水发生物质交换，改变地下水的化学组成。在碳酸盐岩地区，地下水与岩石发生溶蚀作用，会使水中的钙离子、碳酸氢根离子含量升高；在富含硫化物的地区，地下水可能会因硫化物氧化而呈现酸性，并含有较高浓度的硫酸根离子。因此，在分析水文地球化学特征与地下水污染关系时，需要综合考虑污染源排放、同位素特征以及地质环境等多方面因素，才能准确识别污染源。

二、识别技术方法

水化学分析是识别地下水污染源的基础且重要的技术方法。通过对地下水中各类阴阳离子、微量元素以及溶解气体等进行精确测定，能够获取地下水的化学组成信息。常见的阴阳离子分析包括氯离子、硫酸根离子、钠离子、钙离子等，这些离子的含量和比例关系能够反映地下水的水化学类型，如氯化物型水、硫酸盐型水等。微量元素分析则可以检测到一些具有指示意义的元素，如重金属元素和稀土元素等。通过绘制水化学类型图、离子比值图等，能够直观地展示地下水化学特征的空间分布差异，从而初步判断污染源的类型和可能位置。若某区域地下水中氯离子含量异常高，且与钠离子比值呈现特定规律，可能暗示存在生活污水或工业废水污染。

同位素分析技术在地下水污染源识别中具有独特优势。稳定同位素分析主要包括氢、氧、碳、硫等元素的同位素分析。氢氧同位素比值可用于判断地下水的补给来源和循环过程，若某地区地下水中氢氧同位素比值偏离当地大气降水线，可能存在不同来源水的混合，结合其他化学特征，有助于识别污染源。碳同位素分析可用于区分有机污染物的来源，不同类型的有机污染物具有不同的碳同位素组成，通过分析地下水中有有机碳的同位素特征，能够判断其是来源于化石燃料、生物降解还是其他来源。放射性同位素分析中，氚常用于确定地下水的现代补给量，碳 - 14 可用于估算地下水的年龄，通过分析放射性同位素的含量变化，能够了解污染物在地下水中的迁移时间和历史，为污染源识别提供时间维度的信息。

多元统计分析方法能够对大量复杂的水文地球化学数据进行有效处理。主成分分析通过对原始数据进行降维处理，提取出最

能反映数据特征的主成分，从而简化数据结构，揭示数据间的潜在关系。聚类分析则根据数据的相似性，将地下水样本划分为不同的类别，同一类别的样本可能具有相似的污染源或污染过程。因子分析可以识别出影响地下水化学特征的主要因素，通过对因子得分的分析，能够确定每个样本受不同因素影响的程度，进而推断污染源。这些多元统计方法与水化学分析、同位素分析相结合，能够更全面、准确地识别地下水污染源。

三、数据处理分析

原始水文地球化学数据的质量直接影响污染源识别结果的准确性，因此数据质量控制是数据处理分析的首要环节。在数据采集过程中，严格遵循采样规范，确保样品的代表性和真实性。对采集的样品进行实验室分析时，采用标准物质进行质量控制，定期对分析仪器进行校准和维护，保证分析结果的准确性和可靠性。对于异常数据，通过重复采样分析、检查采样和分析过程等方式，判断数据异常的原因，若为错误数据则予以剔除；若为真实反映特殊地质或污染情况的数据，则进行合理的标注和说明。对数据进行完整性检查，确保所有必要的参数都已测量和记录。

数学模型在水文地球化学数据处理分析中发挥着重要作用。质量守恒模型基于物质守恒原理，能够描述污染物在地下水中的迁移转化过程，通过建立质量守恒方程，结合初始条件和边界条件，可求解污染物在不同时间和空间的浓度分布。反应 - 传输模型则进一步考虑了污染物与地下水、岩石之间的化学反应，如吸附、解吸、沉淀、溶解等过程，更真实地模拟污染物在地下水中的行为。通过将实际监测数据代入模型进行参数率定和验证，不断调整模型参数，使模型能够更好地拟合实际情况，从而提高模型预测的准确性。这些模型不仅可以用于解释已有的污染现象，还能够预测污染物的扩散趋势，为污染防治提供决策支持。

地理信息系统（GIS）技术为水文地球化学数据的可视化和空间分析提供了强大工具。将地下水化学组分、同位素数据以及其他相关信息与空间坐标相结合，在 GIS 平台上生成专题地图，如化学组分浓度分布图、同位素比值等值线图。通过地图展示，可以直观地观察到污染物的空间分布特征，发现污染浓度高值区和异常区域。利用 GIS 的空间分析功能，如空间插值、缓冲区分析、叠置分析等，能够进一步分析污染物分布与地质、地形、土地利用等因素之间的关系，挖掘潜在的污染源信息。GIS 还支持多源数据的集成和管理，方便对不同类型数据进行综合分析，提高污染源识别的效率和准确性。

四、模型构建应用

构建地下水污染源识别模型需充分考虑不同地区的地质、水文地质条件和污染源特点。在地质条件简单、含水层均质的地区，可采用相对简单的解析模型，如一维或二维的对流 - 扩散模型。这类模型基于质量守恒和能量守恒原理，通过数学方程描述污染物在地下水中的对流和扩散过程，能够快速求解污染物的

浓度分布。然而，在实际复杂地质条件下，如存在多层含水层、断层、裂隙等，解析模型的适用性受到限制，此时需运用数值模型，如有限差分法、有限元法建立的数值模型。数值模型能够更灵活地处理复杂的边界条件和地质结构，通过将研究区域离散化，对每个离散单元进行计算，从而更准确地模拟污染物的迁移转化过程。

模型构建过程中，参数的确定至关重要。模型参数包括水文地质参数，如渗透系数、弥散度等，以及化学反应参数，如吸附系数、反应速率常数等。这些参数的获取可通过现场试验、室内实验以及参考已有研究成果等方式。现场试验如抽水试验、弥散试验能够直接获取研究区域的水文地质参数，但成本较高、耗时较长。室内实验则可在实验室条件下模拟地下水环境，测定化学反应参数。还可利用已有的地质、水文地质资料，结合经验公式估算模型参数。在确定参数后，通过与实际监测数据对比，对模型进行校准和验证，调整参数值，使模型模拟结果与实际情况尽可能吻合，确保模型的准确性和可靠性。

将构建好的模型应用于实际地下水污染源识别案例，能够为污染治理提供科学依据。通过模型预测污染物的扩散范围和浓度变化趋势，可指导布设监测井的位置和数量，优化监测方案。根据模型识别出的污染源位置和强度，制定针对性的污染防控措施，如封堵污染源、设置防渗墙、开展原位修复等。在污染治理过程中，持续利用模型对治理效果进行评估和预测，根据实际情况及时调整治理方案，确保地下水污染得到有效控制。模型的应用不仅提高了污染源识别的效率和准确性，还为地下水污染治理提供了量化的决策支持。

五、实践效果评估

评估水文地球化学特征应用于地下水污染源识别的实践效果，需从多个维度进行综合考量。在识别效率方面，与传统的污染源识别方法，如现场调查法、示踪剂法相比，基于水文地球化学特征的识别方法能够快速处理大量数据，通过建立模型和数据

分析，在较短时间内初步确定污染源的可能范围和类型。传统现场调查法需耗费大量人力、物力进行实地勘查，且在复杂地形和隐蔽污染源情况下，调查难度大、效率低；示踪剂法虽然准确性较高，但存在示踪剂投放和监测成本高、对环境可能产生二次污染等问题。水文地球化学方法在提高识别效率的降低了人力和经济成本。

准确性评估是实践效果评估的关键环节。通过将识别结果与实际污染源信息进行对比，验证方法的可靠性。在实际应用中，可结合后续的污染治理措施实施效果进行反向验证。若根据识别结果采取的治理措施能够有效降低地下水污染浓度，改善水质，则说明识别结果具有较高的准确性。通过在不同地区、不同类型污染源的案例中应用该方法，统计识别结果的准确率，分析影响准确性的因素，如数据质量、模型适用性、地质条件复杂性等，总结经验教训，不断改进方法，提高识别准确性。

适用性和稳定性评估主要考察该方法在不同地质、水文地质条件和污染源类型下的应用效果。在不同地质条件，如山区、平原、岩溶地区等，以及不同污染源类型，如工业污染、农业污染、生活污染等场景中应用该方法，分析识别结果的差异和可靠性。若在多种条件下都能稳定、准确地识别污染源，则说明该方法具有良好的适用性和稳定性。评估方法在长期应用过程中的稳定性，随着时间推移，地下水资源环境可能发生变化，需考察方法是否能适应这些变化，持续有效识别污染源，为地下水污染防治提供稳定可靠的技术支持。

六、结束语

水文地球化学特征凭借其其与地下水污染过程的紧密联系，在污染源识别领域发挥着不可替代的作用。未来，随着高分辨率分析技术、大数据与人工智能的深度融合，该领域将向智能化、精细化方向迈进。构建跨区域、多尺度的综合识别体系，加强多学科协同研究，将为地下水污染防治提供更高效、精准的技术保障，推动地下水生态环境的可持续发展。

参考文献

- [1] 王焰新. 水文地球化学 [J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 1-14.
- [2] 张光辉, 严明疆, 刘春华等. 中国地下水污染研究现状与展望 [J]. 地球学报, 2017, 38(3): 263-276.
- [3] 郭华明, 沈照理, 朱宛华等. 地下水污染的水文地球化学研究进展 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 161-166.
- [4] 刘存富, 王文科, 杨泽元等. 水文地球化学方法在地下水污染源识别中的应用 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 175-180.
- [5] 陈宗宇, 聂振龙, 张兆吉等. 地下水污染调查评价方法研究进展 [J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1455-1463.
- [6] 滕彦国, 倪师军, 张成江等. 地下水污染评价方法研究 [J]. 物探与化探, 2007, 31(1): 85-90.
- [7] 卢文喜, 杨悦, 李平. 地下水污染数值模拟研究进展 [J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 1-6.
- [8] 李义曼, 韩占涛, 王兆馨等. 多元统计分析在地下水水质评价中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 136-143.
- [9] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛等. 地下水污染同位素示踪研究进展 [J]. 地球学报, 2011, 32(3): 265-273.
- [10] 武强, 孙亚军, 董东林等. 中国煤矿区地下水污染现状及防治对策 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 1-13.