

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.217>

Short Survey



含水层非均质性与污染修复

袁松虎¹, 张鹏¹, 康学远², 施小清², 张宝刚³, 洪梅⁴, 田海龙⁴, 文章¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430078
2. 南京大学地球科学与工程学院, 表生地球化学教育部重点实验室, 江苏南京 210023
3. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083
4. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室/石油化工污染场地控制与修复技术国家地方联合工程实验室, 吉林长春 130021

随着我国城市化进程及“退二进三”政策实施, 重点行业退役、搬迁、遗留的场地土壤与地下水污染问题日渐突出(骆永明和滕应, 2020). 原位化学/生物修复和强化自然衰减等是修复污染地下水的常用技术, 然而含水层结构非均质性易引起修复过程中污染物的反向扩散、拖尾和反弹等, 同时含水层介质氧化还原非均质性使修复药剂投加量和修复周期等难以准确评估, 这些挑战性问题极大地限制了修复技术的成功实施(Seol *et al.*, 2003; Stroo *et al.*, 2012; Fang *et al.*, 2018; 侯德义, 2022). 因此, 准确表征含水层结构非均质性与氧化还原非均质性, 定量刻画含水层非均质对污染物迁移转化与污染修复的制约机制, 是破解上述挑战性难题的关键, 也是制定绿色、高效、经济的地下水污染修复策略的理论基础.

含水层的非均质性具有结构性和尺度性(Yeh *et al.*, 2015). 含水岩组的空间叠置、接触和组合关系构成了含水层系统结构, 既在地层内部具有微层理等小尺度非均质性, 也在不同地层分布上展示出随沉积相变化的场地/区域尺度非均质性. 目前刻画场地含水层结构非均质性的方法, 主要有直接取样观测方法和基于间接观测响应的层析成像技术. 直接取样方法观测精度高, 其垂向分辨率为

分米级, 但其取样数量受限, 横向分辨率往往大于 10 m, 因而难以捕获含水层结构的三维空间分布(吴吉春, 2006; Zhao and Illman, 2022). 间接成像技术通过对含水层施以外界刺激, 观测其响应信号, 并据此反推含水层结构. 间接成像技术相对廉价, 数据量丰富且空间覆盖率大, 可获取面上甚至体上的含水层结构信息, 其横向分辨率可达米级, 克服了直接取样以点代面的缺陷, 但成像数据的解译存在一定不确定性(Linde *et al.*, 2017; 康学远等, 2018; 蒋立群等, 2021). 针对场地污染修复, 分米和厘米尺度的非均质性变化会显著影响污染物空间分布(Kueper *et al.*, 2014; Ferrari *et al.*, 2015), 从而影响修复效果. 为解决刻画精度需求与现有技术空间分辨率不足的矛盾, 亟需提高现有刻画与成像技术的空间分辨率, 并发展多源数据融合技术实现多源多尺度信息互补.

氧化还原容量是表征含水层氧化还原非均质性的核心指标. 化学探针法是表征含水层介质氧化还原容量的常用方法之一, 然而受化学探针活性和稳定性的影响, 现有化学探针法的测试结果与理论值经常相差数倍, 无法为场地修复提供定量指导(Barcelona and Holm, 1991; Seol *et al.*, 2003). 为了克服化学探针法测不准的问题, 近年来提出了介导

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2023YFC3706500); 国家杰出青年科学基金项目(No.42025703).

作者简介: 袁松虎(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境水文地球化学方面的教学和科研工作. E-mail: yuansonghu622@cug.edu.cn

引用格式: 袁松虎, 张鹏, 康学远, 施小清, 张宝刚, 洪梅, 田海龙, 文章, 2024. 含水层非均质性与污染修复. 地球科学, 49(1): 375–378.

Citation: Yuan Songhu, Zhang Peng, Kang Xueyuan, Shi Xiaoqing, Zhang Baogang, Hong Mei, Tian Hailong, Wen Zhang, 2024. Aquifer Heterogeneity and Contamination Remediation. *Earth Science*, 49(1): 375–378.

电化学法。虽然该方法测试精度达到 $\text{mmol e}^-/\text{kg}$ 级别,但是受工作电极活性与容积的限制,该方法只能测试溶解态和黏土组分的氧化还原容量,而无法测试大颗粒(如粉砂)的氧化还原容量(Aeschbacher *et al.*, 2010; Lau *et al.*, 2015; Hoving *et al.*, 2017)。然而实际非均质含水层广泛地存在粉粒和砂粒等大颗粒,因此亟需开发非均质含水层介质氧化还原容量分析方法。此外,介导电化学法需要电化学专业知识来维护电极和操控电化工作站,因此需要开发相应的仪器设备以降低使用门槛。对于场地修复而言,除了需要研究污染修复的受控机制外,还需要根据现场情况实时测试含水层介质氧化还原容量从而对药剂投加量做出及时指导,因此非常有必要研发现场快速分析测试方法和设备。

场地含水层结构和氧化还原非均质性是影响氧化还原敏感污染物迁移转化的关键因素。已有研究主要集中于结构非均质性的影响,对氧化还原非均质性影响的认识还非常薄弱(Seibert *et al.*, 2016; Engel *et al.*, 2021; 蒋立群等, 2021)。含水层介质中包含有机质、铁/锰矿物和硫化物等氧化还原活性物质,不同物质呈现出不同的电子供给/接收容量和电子释放/存储速率,进而对污染物迁移转化产生差异化影响。已有研究仅针对单一活性物质对污染物时空演化的影响(Fakhreddine *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2023),但由于含水层氧化还原活性物质种类和形态的多样性,详尽研究每种活性物质对污染物迁移转化的影响耗时费力,而氧化还原容量这一指标囊括所有活性物质,可以化繁为简,为解析氧化还原非均质性影响提供了新指标。研究含水层介质氧化还原容量对污染物时空演化的影响机理,对于深入认识污染物在含水层介质中的归趋具有重要意义。

在实际场地修复工程中,由于难以量化表征含水层结构和氧化还原容量的非均质性以及污染物的不均匀分布,使精准修复(修复精准定位、药剂精准投加等)变得非常困难。目前关于含水层结构与氧化还原非均质性影响场地修复的研究主要以实验室模拟为主,而且主要集中于结构非均质性、含

水层介质铁锰矿物和天然有机质等对于修复试剂传输和消耗的影响方面(Seol *et al.*, 2003; Cunningham and Fadel, 2007; Neupauer *et al.*, 2014; 赵勇胜等, 2018; Lu *et al.*, 2021)。关于含水层结构非均质影响修复试剂传输的力学机制,含水层氧化还原非均质性影响修复试剂分解与利用的生物化学机制以及含水层结构与氧化还原非均质性的叠加效应等方面都缺乏理论认识,也缺乏关于污染修复效率与含水层非均质性的定量关系模型。因此研究场地含水层结构与氧化还原非均质性对于污染修复的影响规律与机制,建立非均质性影响污染修复的定量关系模型,对非均质污染场地的精准修复具有重要的指导意义。

综上,含水层非均质性是制约污染物迁移转化和污染修复的关键因素,但是现有的研究存在以下不足:结构非均质性表征分辨率低,氧化还原非均质性缺乏相应的分析方法和设备,含水层结构与氧化还原非均质性对污染物迁移转化和修复的制约作用缺乏定量认识。针对上述需求和问题,包括本文作者在内的 10 家单位组成联合团队,于 2023 年申报科技部重点研发计划项目《场地非均质含水层污染物时空演化的高精度表征》并获得批准。本项目重点研发含水层结构非均质性模拟与成像技术以及含水层介质氧化还原容量分析方法与设备,阐释含水层氧化还原容量对污染物迁移转化的影响机制,揭示含水层非均质性对污染修复的制约机制,建立含水层非均质性制约污染物迁移转化和修复的定量关系模型,并开展应用示范验证,成果预期可为开展非均质污染场地的精准修复提供科学依据。同时作者也呼吁,场地修复研究需同时关注结构和氧化还原的非均质性,以及非均质性对污染物迁移转化和修复的影响,以更为精准地识别和控制污染。

References

- Aeschbacher, M., Sander, M., Schwarzenbach, R. P., 2010. Novel Electrochemical Approach to Assess the Redox Properties of Humic Substances. *Environmental Science & Technology*, 44(1): 87–93. <https://doi.org/10.1021/es902627p>

- Barcelona, M. J., Holm, T. R., 1991. Oxidation-Reduction Capacities of Aquifer Solids. *Environmental Science & Technology*, 25(9): 1565–1572. <https://doi.org/10.1021/es00021a006>
- Cunningham, J. A., Fadel, Z. J., 2007. Contaminant Degradation in Physically and Chemically Heterogeneous Aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(3–4): 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.07.011>
- Engel, M., Boye, K., Noël, V., et al., 2021. Simulated Aquifer Heterogeneity Leads to Enhanced Attenuation and Multiple Retention Processes of Zinc. *Environmental Science & Technology*, 55(5): 2939–2948. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06750>
- Fakhreddine, S., Prommer, H., Gorelick, S. M., et al., 2020. Controlling Arsenic Mobilization during Managed Aquifer Recharge: The Role of Sediment Heterogeneity. *Environmental Science & Technology*, 54(14): 8728–8738. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00794>
- Fang, G. D., Chen, X. R., Wu, W. H., et al., 2018. Mechanisms of Interaction between Persulfate and Soil Constituents: Activation, Free Radical Formation, Conversion, and Identification. *Environmental Science & Technology*, 52(24): 14352–14361. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04766>
- Ferrari, A., Jimenez-Martinez, J., Le Borgne, T., et al., 2015. Challenges in Modeling Unstable Two-Phase Flow Experiments in Porous Micromodels. *Water Resources Research*, 51(3): 1381–1400. <https://doi.org/10.1002/2014wr016384>
- Hou, D. Y., 2022. Ten Grand Challenges for Groundwater Pollution Prevention and Remediation at Contaminated Sites in China. *Research of Environmental Sciences*, 35(9): 2015–2025 (in Chinese with English abstract).
- Hoving, A. L., Sander, M., Bruggeman, C., et al., 2017. Redox Properties of Clay-Rich Sediments as Assessed by Mediated Electrochemical Analysis: Separating Pyrite, Siderite and Structural Fe in Clay Minerals. *Chemical Geology*, 457: 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.03.022>
- Jiang, L. Q., Sun, R. L., Liang, X., 2021. Predicting Groundwater Flow and Transport in Heterogeneous Aquifer Sandbox Using Different Parameter Estimation Methods. *Earth Science*, 46(11):4150–4160 (in Chinese with English abstract).
- Kang, X. Y., Shi, X. Q., Deng, Y. P., et al., 2018. Assimilation of Hydrogeophysical Data for the Characterization of Subsurface Heterogeneity Using Ensemble Kalman Filter (EnKF). *Advances in Water Science*, 29(1): 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Kueper, B. H., Stroo, H. F., Vogel, C. M., et al., 2014. Chlorinated Solvent Source Zone Remediation. Springer, New York.
- Lau, M. P., Sander, M., Gelbrecht, J., et al., 2015. Solid Phases as Important Electron Acceptors in Freshwater Organic Sediments. *Biogeochemistry*, 123(1): 49–61. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-0052-5>
- Linde, N., Ginsbourger, D., Irving, J., et al., 2017. On Uncertainty Quantification in Hydrogeology and Hydrogeophysics. *Advances in Water Resources*, 110: 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.014>
- Lu, T. T., Gilfedder, B. S., Peng, H., et al., 2021. Effects of Clay Minerals on the Transport of Nanoplastics through Water-Saturated Porous Media. *Science of the Total Environment*, 796: 148982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148982>
- Luo, Y. M., Teng, Y., 2020. Research Progresses and Prospects on Soil Pollution and Remediation in China. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1137–1142 (in Chinese with English abstract).
- Neupauer, R. M., Meiss, J. D., Mays, D. C., 2014. Chaotic Advection and Reaction during Engineered Injection and Extraction in Heterogeneous Porous Media. *Water Resources Research*, 50(2): 1433–1447. <https://doi.org/10.1002/2013wr014057>
- Seibert, S., Atteia, O., Ursula Salmon, S., et al., 2016. Identification and Quantification of Redox and pH Buffering Processes in a Heterogeneous, Low Carbonate Aquifer during Managed Aquifer Recharge. *Water Resources Research*, 52(5): 4003–4025. <https://doi.org/10.1002/2015wr017802>
- Seol, Y., Zhang, H., Schwartz, F. W., 2003. A Review of in Situ Chemical Oxidation and Heterogeneity. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(1): 37–49. <https://doi.org/10.2113/9.1.37>
- Stroo, H. F., Leeson, A., Marqusee, J. A., et al., 2012. Chlorinated Ethene Source Remediation: Lessons Learned. *Environmental Science & Technology*, 46(12): 6438–6447. <https://doi.org/10.1021/es204714w>
- Wu, J. C., 2006. Carry on the Study of Data Fusion for the Aquifer Heterogeneity. *Geological Journal of China Universities*, 12(2): 216–222 (in Chinese with English abstract).
- Yeh, T. C., Khaleel, R., Carroll, K. C., 2015. Flow through Heterogeneous Geologic Media. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zhang, B. G., Zhang, H., He, J. X., et al., 2023. Vanadium

- in the Environment: Biogeochemistry and Bioremediation. *Environmental Science & Technology*, 57(39): 14770–14786. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04508>
- Zhao, Y.S., Han, H.H., Chi, Z.F., et al., 2018. Study on the Influence of Contrasts of Hydraulic Conductivity on the Migration of Contaminants in Low - Permeability Lens. *China Environmental Science*, 38(12): 4559–4565 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. F., Illman, W. A., 2022. Improved High-Resolution Characterization of Hydraulic Conductivity through Inverse Modeling of HPT Profiles and Steady-State Hydraulic Tomography: Field and Synthetic Studies. *Journal of Hydrology*, 612: 128124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128124>
- Short Survey

中文参考文献

- 侯德义, 2022. 我国工业场地地下水污染防治十大科技难题. *环境科学研究*, 35(9): 2015–2025.
- 蒋立群, 孙蓉琳, 梁杏, 2021. 含水层非均质性不同刻画方法对地下水流和溶质运移预测的影响. *地球科学*, 46(11):4150–4160.
- 康学远, 施小清, 邓亚平, 等, 2018. 基于EnKF融合地球物理数据刻画含水层非均质性. *水科学进展*, 29(1): 40–49.
- 骆永明, 滕应, 2020. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望. *土壤学报*, 57(5): 1137–1142.
- 吴吉春, 2006. 开展含水层非均质性数据融合研究. *高校地质学报*, 12(2): 216–222.
- 赵勇胜, 韩慧慧, 迟子芳, 等, 2018. 渗透系数级差对污染物在低渗透透镜体中的迁移影响研究. *中国环境科学*, 38(12): 4559–4565.