

试论场地污染水文地质学

赵勇胜

Discussion on the site contamination hydrogeology

ZHAO Yongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国际水文地质学家协会进展

Progress of International Association of Hydrogeologists

韩再生, 王皓, 倪增石 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 173-178

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195

电镀场地重金属铬污染土固化率及稳定性研究

A study of the curing rate and stability of heavy metal chromium contaminated soil at electroplating sites

王露艳, 刘干斌, 周晔, 陈航, 陈斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 183-189

基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 1-7

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

川藏铁路雅安至林芝段重大工程水文地质问题

Major engineering hydrogeological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway

许模, 蒋良文, 李潇, 漆继红, 张强, 李晓 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 13-22



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311032

赵勇胜. 试论场地污染水文地质学[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 222-228.

ZHAO Yongsheng. Discussion on the site contamination hydrogeology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 222-228.

试论场地污染水文地质学

赵勇胜

(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/吉林大学, 吉林 长春 130021)

摘要: 随着地下水污染问题越来越受到重视, 小尺度场地水文地质工作需求日益强烈。污染场地对水文地质工作的要求具有特殊性, 具体包括: (1) 小尺度, 高分辨率; (2) 既要研究污染物泄漏的污染过程, 也要研究修复状态下的污染物去除过程; (3) 特别需要关注注入含水层的修复剂流体(气体、液体、胶体、微生物等)与地层介质、目标污染物的作用。而传统大尺度的水文地质学难以完全满足上述工作的实际需求。地下水污染场地的控制与修复需要多学科协同, 其中水文地质学最为关键。因此, 有必要提出水文地质与环境工程学科交叉的“场地污染水文地质学”, 以适应地下水污染场地的风险管理的需求。文章重点论述了场地污染水文地质学小尺度地层结构与污染羽的刻画、“污染物—水—岩”作用的定量描述以及非均质地层中污染物在多相体系中的作用和影响等, 提出了场地污染水文地质学的主要研究内容和需要解决的关键问题, 包括: (1) 小尺度下场地高分辨率刻画; (2) 污染过程和修复过程中污染物在地下环境中的物理、化学和生物作用的定量描述; (3) 场地尺度污染物在地下环境介质中的迁移转化; (4) 修复剂(助剂)在地下环境中的传输与反应; (5) 非均质与非渗透地层污染的控制与修复。

关键词: 场地污染水文地质学; 小尺度; 非均质含水层; 修复剂流体; 多相体系作用

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0222-07

Discussion on the site contamination hydrogeology

ZHAO Yongsheng

(National and Local Joint Engineering Laboratory for Petrochemical Contaminated Site Control and Remediation Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract: With the increasing attention paid to groundwater contamination issues, the increasing demand was needed for small-scale site contamination hydrogeological work. The site contamination hydrogeological work has some particularities, which includes small scale, high resolution, and not only studying of contamination processes with the source leakage, but also studying of contaminant removal under the remediation state. Especially the transportation and reactions in the aquifer for in situ injected fluids (gases, liquids and microbes) of remediation agents need to be concerned greatly. The traditional large-scale hydrogeological work is difficult to meet the special needs above, therefore, it is necessary to propose “site contamination hydrogeology” for site-scale groundwater pollution risk management. This paper focuses on the characterization of stratigraphic media and pollution plumes in small-scale contaminated site, quantitative description of the pollutant-water-rock reactions, and the role and influence of pollutants in heterogeneous strata in multiphase systems. Finally, the main research content and key issues for site contamination hydrogeology were proposed, including: high-resolution

收稿日期: 2023-11-10; 修订日期: 2024-01-12

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072270)

作者简介: 赵勇胜(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下水污染控制与修复研究。E-mail: zhaoyongsheng@jlu.edu.cn

characterization of sites at small scales, quantitative description of the physical, chemical, and biological reactions of pollutants in the underground environment during pollution and remediation processes, the migration and transformation of pollutants at the site scale in underground environmental media, transport and reaction of remediation agents (additives) in underground environments, and the pollution control and remediation in heterogeneous and low-permeability formations.

Keywords: site contamination hydrogeology; small-scale; heterogeneous aquifer; remedy fluid; multiphase system

我国土壤、地下水的污染问题已经受到了普遍关注,对各类污染场地开展了场地调查、风险评估以及污染的控制与修复工作。但与这项工作开展较早的发达国家相比,我国的污染场地控制与修复工作对于场地水文地质学方面的重视和要求尚有较大的差距。其原因有多个方面,但缺少水文地质专业人员和队伍的参与可能是主要原因之一。此外,也存在着缺乏对场地规模和尺度下的水文地质学工作特殊性的研究和探索。

在污染场地的控制与修复工作中,场地水文地质工作尤为重要^[1],它决定着场地污染控制与修复的成败。国际上普遍认为水文地质工作是污染场地工作的关键所在,提出“没有脱离场地的地下水污染修复技术”,以及“以地质为中心的污染场地修复”^[2]。污染场地的控制与修复对场地水文地质在尺度、精度和定量化研究等方面具有更高的要求,传统污染水文地质在上述方面难以满足地下水污染场地工作的实际需求。因此,很有必要深入分析污染场地对水文地质工作的需求,及其与传统水文地质工作的差异。

结合作者多年来在污染场地教学与研究工作的实践,本文提出“场地污染水文地质学”的研究方向。与传统水文地质学在研究方法、技术等方面进行了分析对比,重点对场地尺度地层参数与污染羽刻画、场地污染物和修复剂流体在地下环境中作用过程的定量描述、非均质和低渗透地层对污染物的作用和影响等问题进行了分析论述。同时,提出仅依靠增大工作精度,难以彻底解决场地地下水污染的问题,场地尺度的水文地质研究需要在传统水文地质学的基础上,探索新的理论、方法和技术。最后,阐述了场地污染水文地质学的主要研究内容和需要解决的关键问题。

1 场地污染水文地质学的提出

随着地下水污染日趋严重,国际上对地下水污染

的调查、模拟预测和评价、污染的控制与修复越来越重视。人们逐渐认识到场地地下水污染调查、评价与控制修复工作具有地学与环境学多学科交叉的特点,在研究工作中把水文地质学与环境科学与工程相结合。从1986年开始,Elsevier出版了《污染物水文学期刊》(Journal of contaminant hydrology);Fetter^[3]出版了《污染物水文地质学》,Christopher^[4]出版了《污染物水文地质学原理》,标志着研究者们逐渐重视水文地质学与环境污染的密切关系。国际上提出的“污染物水文地质学”是对传统水文地质学的拓展,更加重视地下环境中的污染物与水文地质的关系。上述专著的目的是服务于地下水污染调查、监测和治理,主要论述了地下水化学分析、含水层试验等水文地质方法技术。具体内容包括:地下环境中的物质迁移,溶质转化、阻滞和衰减,多相流,地下水中的无机和有机化学物质,地下水和土壤监测以及污染的控制与修复技术等。研究尺度多是基于大尺度,如地区尺度、流域或盆地尺度等,没有聚焦场地尺度水文地质工作的特殊性。

我国对于地下水污染问题的研究比较重视,1998年,陈梦熊院士对我国环境水文地质学的发展进行了分析和论述^[5]。从20世纪70年代开始,我国已经对大多数大中城市开展了地下水污染的调查评价,但主要是基于水文地质学,开展地下水污染源、污染途径、模拟预测等研究工作。之后对地下水污染的研究越来越重视,在溶质运移、污染物与水岩的作用、污染的控制与修复等方面开展了较为系统的研究。我国将地下水污染的研究内容主要归属于环境水文地质学领域^[5]。

近年来,随着对地下水污染工作重视程度的提升,开展了大量场地尺度的地下水污染工作,包括地下水污染场地调查、模拟预测、风险评估、污染控制与修复等。作者在实际工作中发现小尺度场地的诸多问题,基于大尺度的水文地质学或提出的“污染物

水文地质学”方法或原理难以完全解决。其原因是小尺度的地下水污染场地工作具有独特性。

(1)地下水污染场地规模很小需要高分辨率刻画

地下水污染包括生活、工业和农业等污染源,一般位于松散地层,而以“场地”的形式出现,呈点状、片状;在基岩断裂裂隙与岩溶裂隙含水层中,地下水的污染距离可能要大一些。与传统水文地质单元相比,地下水污染场地的尺度非常小,可能相差几个数量级。地下水污染场地工作图件的比例尺一般为 1 : 1 000 甚至更大,而传统水文地质工作图件的比例尺可达 1 : 100 000 或更小。

统计美国 184 个地下水污染场地污染羽的尺度规模,结果见图 1,其中地下水污染羽的最大纵向迁移距离为 300 m,横向迁移距离为 150 m。因此,与传统水文地质的大尺度相比,小尺度的地下水污染场地对地层岩性、污染羽的刻画等要求更高的分辨率。

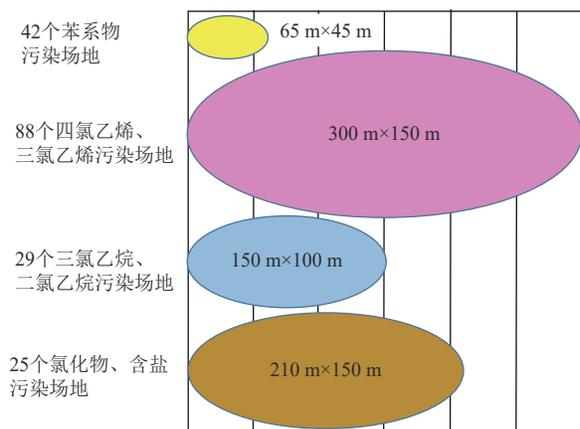


图 1 美国 184 个地下水污染场地污染羽展布统计^[1]
Fig. 1 Statistics on the distribution of pollution plumes in 184 groundwater pollution sites in the United States^[1]

(2)场地勘探精度的问题

传统水文地质工作的精度与工作区的比例尺大小有关,不同的比例尺精度,钻孔布置的数量不同。在地下水污染场地尺度,勘探钻孔的布置会影响污染场地概念模型的建立。图 2 为同一污染场地不同勘探精度的情形。由于钻孔增加,对场地地层岩性刻画的分辨率增大,可以更为准确地描述场地的实际情形。勘探精度导致地下水污染羽的刻画存在很大差异。

(3)地下水污染过程和污染去除过程的研究

场地尺度的地下水污染研究既要考虑污染物渗漏的污染过程,也要研究修复状态下的污染物去除过程,这两个过程中的污染物的作用有较大的差异。例

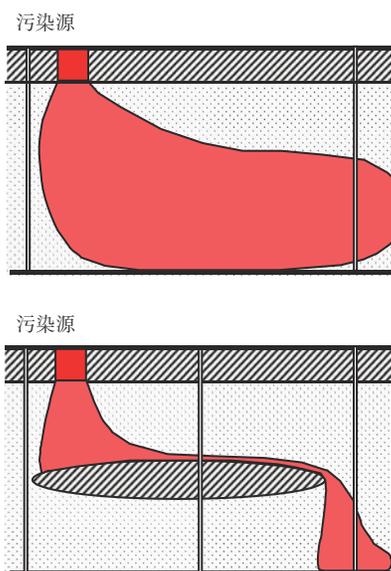


图 2 勘探孔的布置与污染概念模型
Fig. 2 Layout of exploration holes and conceptual model of pollution

如污染物渗漏过程中,通常会在地下形成生物地球化学顺序氧化还原分带,包括产甲烷带、硫酸盐还原带、铁/锰还原带、硝酸盐还原带和氧化还原带。在修复过程中,污染物除了与地层介质作用外,与修复药剂的物理、化学和生物作用更为重要。因此需要研究污染和修复过程中污染物的作用行为。

①场地尺度下,地层介质参数获取及污染羽的准确刻画方法。

②场地尺度下,污染过程中污染物在地下环境中的物理、化学和生物作用的定量描述。

③场地尺度下,污染物非混溶多相体系的作用过程描述。

④场地尺度下,低渗透、非均质地层对污染物迁移转化的影响等。

(4)修复剂流体与污染物/含水层介质作用过程的准确刻画

当对地下水污染进行修复,特别是需要原位注入修复剂时,在地下含水层体系中发生复杂的物理、化学和生物作用过程,需要对其进行准确刻画。利用传统的“对流-弥散-反应”数值模型,难以描述复杂的修复剂与污染物和地层介质的作用过程。

①修复剂在地下环境中与目标污染物的物理、化学和生物反应的定量描述(热力学、反应动力学)。

②修复剂在含水层中的非目标反应及其作用机制。

③不同修复技术修复效果的模拟预测评估。

综上所述,小尺度的地下水污染场地对水文地质

工作的要求具有特殊性, 随着地下水污染场地问题越来越受到重视, 对场地水文地质工作的需求日益增强, 因此, 提出并研究场地污染水文地质学很有必要。

2 场地污染水文地质学需要解决的问题

污染场地由于其地下水污染羽范围有限, 所以对于地层岩性和污染羽的刻画、污染物在地下环境中的各种作用过程的描述都具有小尺度的特点^[6]。场地污染水文地质学要解决的问题包括四个方面。

(1) 场地地层岩性和污染羽的刻画要求更高的分辨率尽量小的平均化

地下水污染场地的刻画包括地层岩性的刻画、含水层相关参数的获取以及地下水取样分析、目标污染物分布等。参数获取、岩性和污染羽刻画要求尽量避免平均化。图 3 为不同尺度地层介质特性变化示意图, 图中的含水层特性可以是孔隙度、渗透系数等描述含水层特性或污染特性的参数。地下水动力学中把地层介质特性参数值(如孔隙度等)不再变化时的观测体积称为代表单元体(representative elementary volume, REV)^[7]。从图 3 中可以看出, 小尺度情形下, 含水层的特性参数值变化很大, 具有较强的随机性; 随着尺度的增大, 描述含水层特性的参数值趋向于一个平均值。传统的水文地质学基于经典达西定律, 通常

应用 REV 的概念, 即可以采用参数值平均化的方法。而地下水污染场地, 由于小尺度的特点, 存在如何选择描述地层特性参数的问题。REV 的概念在某些特定研究目标下, 能否直接在场地污染水文地质中应用, 尚需进一步深入研究。

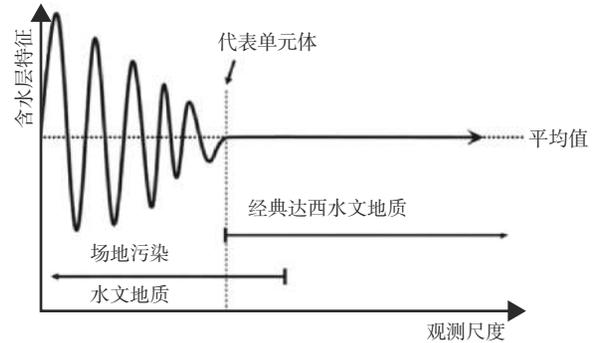


图 3 不同尺度地层介质特性变化示意图 (据文献 [7] 修改)
Fig. 3 Schematic diagram of changes in the characteristics of geological media at different scales (modified after Ref. [7])

分析对比传统水文地质与场地污染水文地质工作的差异, 主要为大区域和小范围的尺度差别、参数平均化和高分辨率刻画、小尺度污染场地更需要对作用过程进行定量描述等(表 1)。地下水污染场地需要什么样的分辨率以及如何提高分辨率也是场地污染水文地质学需要开展的研究内容。

表 1 传统水文地质与污染场地水文地质工作的差异

Table 1 Differences in hydrogeological work between traditional and polluted sites

内容	传统水文地质工作	污染场地水文地质工作
工作精度	小比例尺(大区域)	大比例尺(小范围)
地层岩性	需要进行概化	描述尽可能细致, 更重视非均质和低渗透性介质
地下水流速	平均流速(达西流速)	实际流速
流体	地下水, 水-岩作用体系	地下水、非水相液体(nonaqueous phase liquids, NAPLs), 固-液-气多相体系
水文地球化学环境	天然条件	存在酸、碱、有机自由相等极端条件
地层参数	平均化	高分辨率刻画, 避免平均化

在区域水文地质工作中, 通常对复杂含水层进行地层岩性的概化、地层参数的平均化以及使用地下水的平均流速, 构建水文地质概念模型, 进行地下水流和溶质运移模拟预测等。

图 4 为层状非均质含水层及其平均化后的渗透系数分布示意图。

图 4(a)为实际非均质含水层的渗透系数分布, 其中渗透系数 $K_2 > K_1$; 图 4(b)为平均化后的含水层渗透系数。在大区域水文地质工作时, 不同渗透性的地层交互十分复杂, 构建地下水模型时, 通常需要进行一定的概化:

$$q = \sum_i^n \frac{K_i d_i}{d} \cdot \frac{dh}{dl} = K_x \cdot \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

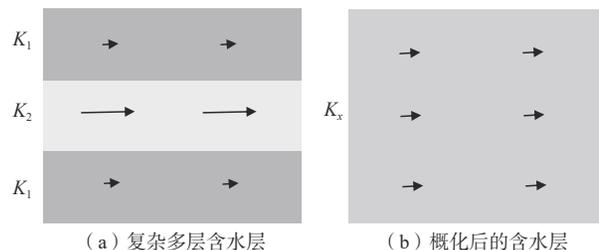


图 4 复杂多层含水层渗透系数及其概化后的平均渗透系数
Fig. 4 Hydraulic conductivity and generalized average hydraulic conductivity of multi-layer aquifers in complex strata

式中: q ——单位含水层截面积的地下水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$);

K_i —— i 地层的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

d_i —— i 地层的厚度/m;

d ——地层总厚度/m;

dh/dl ——地下水水力梯度;

K_x ——概化后含水层的平均渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)。

但在小尺度的污染场地, 地层参数等平均化会带来失真, 不利于地下水污染的准确刻画和污染物的控制与修复, 地下水污染场地工作需要更高的精度和分辨率。

(2) 污染物在地下环境反应过程的精准刻画

小尺度的污染场地要求对污染物的存在形式和相态间作用进行定量描述。对于水混溶性的污染物, 主要有 2 种存在形式: 流动水相和不流动水相。污染物在不流动水相中的质量大于在流动水相中的质量。污染物也有可能被介质吸附。对于非水溶性的污染物, 存在形式包括: 自由相、残余相、吸附相、可流动水相和不流动水相; 其中残余相和不流动水相中的质量较大。

① 污染物的存在形式和相转移

在地下水污染修复过程中, 对于有机污染物, 溶于水的污染物首先被降解去除。根据相平衡理论, 残余相和吸附相的污染物进入水相, 污染物得以持续降解, 但降解的速率受污染物相转移速率的限制。因此, 场地污染水文地质学需要高度关注污染物相转移的问题。

溶解相有机污染物在含水层中的储存能力与有机碳分配系数、含水层介质中有机碳含量比例、含水层的体积含水量和水中溶解浓度有关。如研究污染物溶解在水中和吸附在含水层介质中的质量比例, 假设二者质量相等:

$$C_w \cdot K_{oc} \cdot f_{oc} \cdot \rho_b = C_w \cdot \theta_t \quad (2)$$

式中: C_w ——污染物水中浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

K_{oc} ——有机碳分配系数/($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$);

f_{oc} ——有机碳含量比例/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

ρ_b ——含水层介质容重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

θ_t ——含水层体积含水量/($\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$)。

平衡时的有机碳含量($f_{oc \text{平衡}}$):

$$f_{oc \text{平衡}} = \frac{\theta_t}{K_{oc} \cdot \rho_b} \quad (3)$$

根据式(3)可以绘制溶解—吸附质量相等关系图, 见图 5。含水层体积含水量为 300 L/m^3 ; 含水层介质

容重为 1800 kg/m^3 。在图中 K_{oc} — f_{oc} 关系直线上方污染物的储存以吸附为主, 在下方则为溶解相储存为主。图 5 中标注了一些有机污染的有机碳分配系数, 包括: 氯乙烯(vinyl chloride, VC)、顺式二氯乙烯(cis-dichloroethene, cis-DCE)、三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)、1,1,1-三氯乙烷(1,1,1-trichloroethane, 1,1,1-TCA)、四氯乙烯(perchloroethylene, PCE)和萘(naphthalene, Naph)。

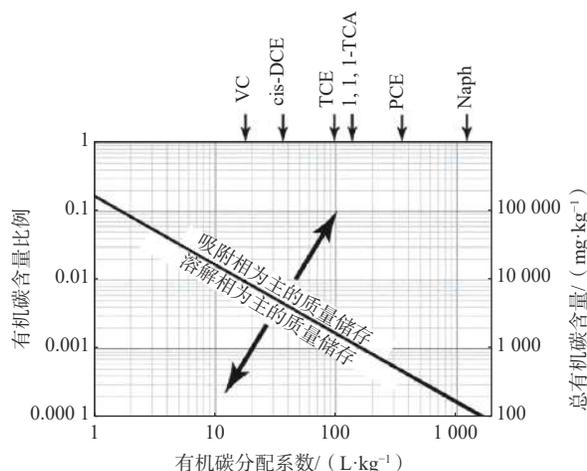


图 5 溶解—吸附质量相等线图 (据文献 [8])

Fig. 5 Dissolution adsorption mass equality line graph (adapted from Ref.[8])

当含水层介质有机碳含量比例小于 0.001 (总有机碳为 1000 mg/kg) 时, 对于 K_{oc} 小于 100 L/kg 的有机污染物 (如 VC、DCE、TCE 等), 其水溶相储存的污染物质量要大于吸附相。由于含水层介质中的有机碳含量一般较小, 所以以吸附相储存的污染物质量较小。但吸附相有机污染物的去除更为困难, 通常要受污染物固—液相分配、转化的控制和影响。

② 修复剂在地层介质中的传输与反应

修复剂(助剂)可以包括液体、气体、纳米材料、菌剂等。修复剂有效的传质是污染修复的前提和基础。因此需要解决的问题包括: 修复剂传输的均匀分布, 场地水文地球化学条件的准确描述 (如 pH-ORP 环境、温度、天然有机物、电子供体/受体、电子传输、反应速率等), 修复剂的非目标反应问题等。

(3) 非均质和低渗透地层对污染物去除的影响机制

自然界的含水层通常是非均质的, 不同渗透性的地层交互沉积或不同渗透性地层呈透镜体状分布等。许多研究表明, 传统溶质运移的对流—弥散理论存在不足。在非均质含水层中, 按照“对流—弥散”理论描述和刻画污染物的迁移, 存在较大的误差。

Adamson 等^[9]研究发现: 渗流路径上含水层渗透系数的变化和孔隙尺度扩散过程, 对含水层中污染物的迁移影响要比水动力弥散更大; 污染羽迁移距离较大或纵向弥散度太大的情形下(如纵向弥散度>20 m), 数值模型的误差很大。采用传统的“对流—弥散”模型, 地层介质非均质性越强, 准确地模拟预测越困难。作者曾进行了层状非均质含水层中污染物的迁移模拟试验, 中间为高渗透性地层($K=10^{-1}$ cm/s), 上、下层为低渗透性地层($K=10^{-4}$ cm/s)。污染物浓度曲线见图 6。试验中污染物浓度的实测曲线与传统对流—弥散理论的曲线差异较大, 没有体现“S”型的变化规律, 表明在高—低渗透性地层界面污染物的扩散作用影响较大。

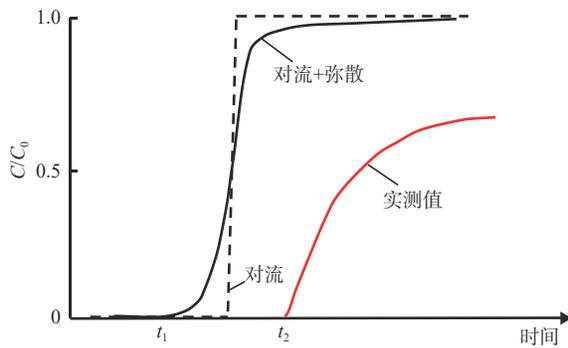


图 6 层状非均质含水层中污染物的浓度曲线
Fig. 6 Concentration curve of pollutants in layered heterogeneous aquifers

根据菲克第一定律, 单位时间内通过截面积(A)的扩散通量(J_x)与该物质在该面积处的浓度梯度($\frac{\partial C}{\partial x}$)成正比:

$$J_x = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \cdot A \quad (4)$$

式中: D —扩散系数。

由于非均质含水层中高—低渗透性地层接触界面的面积非常大, 所以污染物通过高渗透性地层向低渗透性地层的扩散通量较大。污染物迁移以沿高渗透性通道对流为主; 在高渗透性与低渗透性介质界面存在着污染物的扩散作用, 这种扩散作用使污染物进入低渗透性地层, 从而影响污染物的浓度, 影响污染物在高渗透性地层中的迁移。进入低渗透性地层中的污染物, 难以在修复过程中得到去除。因此, 非均质和低渗透性地层介质是地下水污染场地工作中的难点问题。在场地尺度的高分辨率要求下, 污染物的扩散作用, 以及在不同地层间的界面效应等, 也应是研究

的重点之一。

污染物在非均质含水层中的迁移通量是场地尺度水文地质工作的另一个难点。Fred 等^[8]进行了非均质含水层污染物通量的试验研究, 表明污染物一般在低渗透性介质中具有较高的含量, 但在高渗透性的地层中具有较大的污染物迁移通量; 大约 70% 的地下水在 25% 的高渗透性地层断面通过, 90% 的地下水在 50% 的高渗透性地层断面通过。证明了含水层的非均质对于地下水水流的影响巨大, 污染物通量对于径流型的地下水污染控制与修复非常关键。

(4) 场地尺度地下水污染的准确模拟预测

在地下水污染场地尺度, 进行数值模型模拟预测时 also 存在着特殊性。关键的问题为: 利用模型进行模拟分析和预测时, 边界问题如何处理? 在高精度的要求下, 污染修复过程中的物理、化学和生物作用如何准确描述? 数值模型检验和验证观测资料序列要求较长和地下水污染场地调查、修复时间较短的问题等。区域尺度和场地尺度地下水污染模型工作的差异见表 2。进行场地尺度的地下水污染模拟预测更为困难。

表 2 区域尺度与场地尺度地下水污染模型工作的差异
Table 2 Differences in groundwater pollution model work between regional and site scales

内容	区域尺度水文地质模型	污染场地尺度水文地质模型
模拟区域	含水层系统或水文地质单元	污染范围/厂区
边界条件	地质单元的边界, 河流, 断层等	无物理意义上的边界
模拟预测时间	年、季	天、小时
模型输入资料	区域性(分区)、平均值	空间和时间上都尽量避免平均化
流体	地下水	地下水、NAPLs

3 场地污染水文地质主要研究内容和关键技术

场地污染水文地质学的主要研究内容包括五个方面。

(1) 小尺度下场地高分辨率刻画。包括地层岩性和污染羽的三维刻画、地下水流场的刻画、污染源的高分辨率辨析等。

(2) 污染过程和修复过程中污染物在地下环境中的物理、化学和生物作用的定量描述。包括污染物在不同相态间的分配、作用的热力学或动力学描述等。

(3) 场地尺度污染物在地下环境介质中的迁移转化。包括有机污染物、重金属、新污染物、复合污染物在非均质地层中的迁移和归宿, 非混溶多相流问

题,以及地下水中污染物的模拟预测。

(4)修复剂(助剂)在地下环境中的传输与反应。包括气体、液体、胶体以及降解菌等在地层介质中的均匀传质,竞争性无效反应的确定等^[10]。

(5)非均质与低渗透地层污染的控制与修复。高分辨率要求下,污染物的地层界面效应;非均质地层修复剂流体的优先流;解决低渗透地层污染物“出不来”、修复剂“进不去”等处理技术。

场地污染水文地质学的关键技术包括四个方面。

(1)小尺度下地层参数获取、污染物的精准刻画技术。

(2)非均质、低渗透地层中污染物的迁移转化理论和技术。

(3)水文地球化学作用的模拟分析技术。

(4)污染修复过程中污染物和修复剂在地下多相体系中作用过程的理论和技术。

4 结论与建议

(1)水文地质对于污染场地的风险管理具有至关重要的作用,因此,场地污染水文地质学应受到高度关注。地下水污染场地通常具有小尺度的特点,场地污染水文地质学应突出小尺度、高分辨率的特点,在研究方法和技术上应在传统污染水文地质学基础上丰富和拓展,以适应污染场地管理的实际需求。含水层结构模型可以通过提升勘探精度不断接近实际情形,但地下水污染的概念模型,包括污染物/修复剂流体在地下环境中的传输、反应过程的准确描述,有时仅利用提升勘探精度是不够的,需要研究含水层多相体系中污染物-地层介质-修复剂的相互作用过程和机制。

(2)传统水文地质学是建立在观测尺度大于REV的经典达西区域,其各种参数值代表了含水层的平均值。但场地地下水污染修复通常要考虑非达西区域的问题,研究解决这一难题对于污染场地的防治具有重要的意义。

(3)污染场地对非均质含水层的研究更应聚焦非均质的差异性,而不应该采用平均化的处理方法(如等效渗透系数等)。层状或透镜体状地层中污染地下

水的迁移规律、非均质含水层中污染物质量分布与污染物质量通量、污染物/修复剂流体的地层界面效应等都属于场地污染水文地质学的研究内容,具有挑战性,有待进一步深入研究。

(4)在进行小尺度的地下水污染场地调查研究中,同时应了解和掌握大尺度的区域地质条件、区域流场分布、区域水文地球化学及其背景等方面的信息。

参考文献 (References) :

- [1] 赵勇胜. 地下水污染场地的控制与修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [ZHAO Yongsheng. Control and remediation of groundwater contaminated sites[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]
- [2] 11th international conference on the remediation of chlorinated and recalcitrant compounds[M]. California: Palm Springs, 2018.
- [3] FETTER C W. Contaminant hydrogeology[M]. 3rd ed. Springfield: Waveland Press, 2018.
- [4] CHRISTOPHER M P. Principles of contaminant hydrogeology[M]. 2nd ed. Tallahassee: CRC Press, 1996.
- [5] 陈梦熊. 中国水文地质环境地质问题研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1998. [CHEN Mengxiong. Study on hydrogeological and environmental geological problems in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1998. (in Chinese)]
- [6] KOFI A D. Management of contaminated site problems[M]. 2nd ed. Tallahassee: CRC Press, 2019.
- [7] JACOB B. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Dover Publications Incorporation , 1988.
- [8] FRED C P, JOSEPH A Q, SCOTT T P. Remediation hydraulics[M]. Tallahassee: CRC Press, 2008.
- [9] ADAMSON D T, NEWELL C J. Frequently asked questions about monitored natural attenuation in groundwater ESTCP project ER-201211[M]. Roanoke: Environmental Security and Technology Certification Program, 2014.
- [10] SUTHAN S S, JOHN H, MATTHEW S, et al. Remediation engineering—design concepts[M]. Tallahassee: CRC Press, 2017.

编辑: 张若琳