



文章栏目: 专论

DOI 10.12030/j.cjee.202110059 中图分类号 X53 文献标识码 A

马杰. 地下水监测在污染场地管理中的重要作用、存在问题与对策建议[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1063-1067. [MA Jie. Significance, problems and countermeasures of groundwater monitoring for contaminated site management[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1063-1067.]

# 地下水监测在污染场地管理中的重要作用、存在问题与对策建议

马杰<sup>✉</sup>

中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 重质油国家重点实验室, 北京 102249

**摘要** 我国污染场地修复行业长期存在“重土轻水”的现象。然而, 由于土壤与地下水共同构成了有机统一的地下环境, 污染物在土壤和地下水之间存在密切的物质交换, 因此, 充分掌握目标场地的地下水污染状况对于场地环境管理及修复后地块的安全利用起着举足轻重的作用。对地下水监测在整个污染场地环境管理工作中的四方面作用进行了剖析, 阐明了我国污染场地地下水监测中存在的问题, 并针对性地提出了解决思路和政策建议, 以期为我国的污染场地管理提供参考。

**关键词** 污染地块; 场地调查; 风险评估; 土壤; 地下水; 含水层; 饱水带

## 1 污染场地修复管理中地下水的相关问题

### 1.1 场地修复行业中的“重土轻水”问题

场地包括土壤和地下水两大环境介质, 因此, 地下水与土壤环境质量关系密切, 相关管理工作应协同推进。准确掌握地下水污染状况并对受污染的地下水水体进行修复治理是污染场地环境管理的关键任务和核心目标之一。然而, 我国污染场地修复行业长期存在“重土轻水”的问题, 并在我国场地管理工作的不同阶段均有体现<sup>[1]</sup>。具体如下。

1) 在场地调查阶段, 一些调查单位为降低调查成本倾向于回避地下水采样监测。

2) 在风险评估阶段, 个别从业者认为地下水不作饮用水源就不存在人体暴露途径, 在暴露评估和风险表征过程中可忽视地下水中的超标污染物。然而, 除了“饮用地下水途径”外, 地下水中的挥发性污染物(volatile organic compounds, VOCs)还会挥发进入室内或室外空气, 最终产生人群暴露。国外诸多污染场地案例证明了挥发性有机物蒸气入侵暴露途径(vapor intrusion)的潜在危害, 因此, 欧美等地区 and 国家的监管部门在 2000 年前后开始将蒸气入侵暴露途径作为污染场地的重点监管目标<sup>[2-4]</sup>。2018 年 9 月, 美国环保署(US EPA)第一次因蒸气入侵风险而将 2 个场地(密西西比州 Rockwell International Wheel & Trim 场地和得克萨斯州 Delfasco Forge 场地)增补进联邦政府的超级基金场地名单<sup>[2]</sup>。

3) 在修复方案编制阶段, 一些方案编制单位以“地下水不饮用”或其他理由回避本应进行的地下水修复工作。

收稿日期: 2021-10-13; 录用日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21878332, 42177042)

作者简介: 马杰(1986—), 男, 教授, rubpmj@sina.com; ✉通信作者

4) 在修复效果评估阶段, 由于《污染场地地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019) 规定了地下水修复效果评估周期为 2 a<sup>[5]</sup>, 而部分业主出于让地块尽快上市开发的考虑倾向于缩短修复效果评估周期或降低监测频率, 这可能会影响修复效果评估结论的质量与可靠性, 导致问题地块进入土地开发环节。

上述不合理现象会给场地环境管理工作埋下潜在隐患, 为污染地块未来的安全利用带来不可预知的风险。

## 1.2 土壤和地下水中的污染物迁移归趋

土壤和地下水 2 种介质间存在频繁密切的物质交换, 土壤和地下水是密不可分的有机统一体, 共同构成与人类活动密切相关的浅层地下环境 (subsurface environment)。污染物在土壤和地下水 2 种介质间存在界面分配、物理迁移、化学反应、生物降解等多种相互作用机制<sup>[2]</sup>。因此, 在污染场地修复中不应将土壤和地下水割裂开来。

污染物泄漏后在重力作用下通过包气带向下迁移。在迁移过程中, 污染物会通过吸附作用进入土壤固体颗粒表面或土壤天然有机质内部 (固相), 还会通过溶解作用进入土壤孔隙水中 (水相), 部分挥发性有机物甚至会通过挥发进入土壤气中 (气相), 最终同时分布于固、水、气三相中<sup>[2]</sup>。若泄漏量足够大, 污染物会在重力作用下迁移, 最终抵达饱水带, 并通过溶解作用进入地下水, 从而导致饱水带地下水的污染。溶解于地下水的污染物会随着地下水不断向污染源的下游迁移, 导致污染范围进一步扩大, 并最终形成一定面积的地下水污染羽 (groundwater contaminant plume)。在随地下水迁移过程中, 污染物会被饱水带沉积物 (aquifer sediment) 吸附进入沉积物固相进而导致新的饱水带污染。若地下水中的污染物属于挥发性有机物, 随地下水迁移至下游的挥发性有机物还会重新挥发进入污染羽上方的包气带, 进而导致新的包气带污染。另外, 地下水位的波动会使问题更复杂。一方面, 地下水位波动使得溶解于地下水的污染物接触并污染更多的土壤或沉积物; 另一方面, 地下水位上升使得滞留在包气带中的污染物接触并污染更多的地下水。降雨的渗入也会不断将滞留在包气带中的污染物重新溶解或解吸出来, 并随着入渗的雨水最终汇入地下水中, 导致饱水带被污染。

## 2 地下水监测在污染场地管理中的重要作用

1) 地下水监测更容易揭示地层中的污染状况。污染物在土壤中的分布呈现高度非均相性, 垂直或水平方向间隔几米的 2 个土壤样品中污染物的质量浓度可能相差几个数量级。在复杂的污染场地中, 污染物可能随机分布在几个离散区域, 而并非连续整体。因此, 有限土壤监测点位的空间代表性存在较大不确定性<sup>[1]</sup>。对于地质状况复杂或污染严重的场地, 仅依靠土壤监测可能会遗漏重污染区<sup>[1]</sup>。与土壤不同, 地下水是一种流体, 故地下水系统是一个不断循环流动的动态开放系统。进入地下水系统中的污染物会经由扩散、弥散、对流等作用机制源源不断地从污染源向周边环境迁移。在水动力机制作用下, 溶解在地下水中的污染物会扩散迁移并形成连续的地下水污染羽, 其边界往往呈现一定规律性和可预测性。在大型复杂污染场地中, 可能存在多个污染源和多个地下水污染羽, 但每个污染羽的分布范围和边界一般也会呈现一定规律。一般来说, 单个地下水监测点的空间代表性远高于单个土壤监测点, 而单个地下水监测点能捕获的污染范围也远高于单个土壤监测点<sup>[1]</sup>。因此, 地下水监测更容易获取地层中的污染状况, 为污染场地调查中不可或缺的监测指标<sup>[1]</sup>。另外, 若污染物被包气带截留而未进入地下水, 则可通过土壤监测进行污染调查; 当污染物为挥发性有机物时, 则通过土壤气监测进行污染调查<sup>[6]</sup>。

2) 地下水监测是检验场地修复效果的重要标准。我国污染场地修复效果评估主要参照生态环境部发布的 2 项技术指南《污染场地风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5-2018)<sup>[7]</sup> 和《污染场地地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)<sup>[5]</sup> 来进行。由于可能出现地下水修复后污染物浓度反弹或拖尾的现象, 《污染场地地下水修复和风险管控技术导则》将修复达标初期和修复效果评估期均定为 1 a。某些污染场地的业主急于进行修复后土地的开发利用, 常常回避地

下水修复或压缩地下水修复效果评估的时间周期,为修复后地块的安全利用带来隐患。由于土壤和地下水间存在紧密的污染物质量交换关系,地下水中检出的高浓度污染物通常反映了地层中可能还存在未清理完全的污染物,如残留相非水相有机液体(residual NAPL)或吸附在沉积物内的污染物。高浓度的污染物,尤其是挥发性有机物(VOCs)仅分布在地下水中的概率很低,其同时存在于饱水带沉积物中甚至潜水面附近包气带土壤中的可能性很高。由于污染物在土壤中空间分布的高度非均质性,对于地质状况复杂或污染严重的场地,依靠土壤钻孔监测的传统场地调查方法很难准确找到所有的污染区域。在我国很多污染场地修复项目中,修复公司进场后往往先要进行自主补充调查,以便进一步查明地下的污染状况。实际情况是在补充调查、清挖修复,甚至在修复效果评估阶段还能发现新的超标区域。这些实践经验充分反映了土壤非均质性给场地修复治理和后续安全利用带来的不确定性,也充分说明了基于土壤监测的传统场地调查方法的局限性。

相对于土壤的高度非均质性,地下水监测数据的空间代表性更强,更容易揭示地层中残余的污染物状况,特别是挥发性有机物的污染场地。因此,建议监管部门和从业者充分重视修复过程评估阶段及修复效果验收评估阶段的地下水监测工作,尤其需要重视存在挥发性有机物的场地。

**3) 地下水监测可直接指示污染物的跨界迁移风险。**由于地下水的流动性,污染物会随着地下水水流持续不断地向下游迁移。这可能导致污染物随地下水流出原场地边界而影响到周边区域。这一现象被称为污染物跨界迁移(以下简称“污染跨界”)。防范污染跨界是污染场地管理的一项核心任务。按照污染者治理的原则,污染场地周边受影响区域的土地所有权人可通过诉讼等方式要求污染责任人对受到影响的土壤地下水进行修复或给予经济赔偿。这类环境诉讼在欧美等发达国家比较常见。在国内,污染跨界问题对于在产企业尤为重要。实际上,国内部分在产企业也存在因污染跨界而影响周边环境的问题。目前,监管部门尚未对在产企业的污染跨界问题出台专门的管理办法,但是按照《土壤污染防治法》的要求,这类场地应当采取一定的风险管控措施。在产企业无法按照关闭搬迁场地的方式进行大开挖式修复治理,只能采取“重污染源消除+长期风险管控”的模式进行管理。对在产企业厂区边界的地下水进行定期监测并评估是否存在污染跨界问题,应当作为在产企业土壤地下水环境管理工作的重点之一。建议环境管理部门将这部分工作纳入在产企业自行监测和隐患排查的常规工作。

**4) 地下水监测可实现长期多次监测且更容易反映污染物的动态变化规律。**地下水采样监测通常需要建设长期监测井。虽然地下水监测井的建设成本比土壤钻孔高,但监测井一旦建成后便可进行长期多次采样,而土壤监测则每次都要钻取新的土孔(除非只监测表层土)。若要进行多次采样调查,地下水监测的成本远低于土壤。因此,地下水监测更适用于在产企业自行监测等长期多次的监测工作。另外,同一口地下水监测井的长期监测数据可直接反映地层污染状况的时间变化规律,而土壤监测却很难实现这一目标。土壤中的污染物分布具有高度空间非均质性,也无法在同一个土孔中反复多次采样,故土壤污染状况的时间变化规律往往需要通过多个点位采样监测数据的统计分析来获得。但这种方法需要大量的监测数据且不确定性很高,因此,宜采用地下水监测来反映污染物的动态变化。

### 3 我国污染场地地下水监测中存在的问题及对策建议

**1) 地下水常规监测指标与污染场地常见污染物种类不匹配。**不少调查单位开展场地初步调查仅以《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的39项常规指标作为地下水监测因子(有时还会排除2项放射性指标和/或2项微生物指标)<sup>[8]</sup>。实际上,这39项常规指标中的大部分都与工业场地常见污染物无关,如浑浊度、肉眼可见物、总硬度、溶解性总固体、阴离子表面活性剂、耗氧量、铁、钠、硫酸盐、氯化物、总大肠杆菌群、菌落总数、硝酸盐、总 $\alpha$ 放射性、总 $\beta$ 放射性等。对上述指标的监测增加了不必要的经济和时间成本,且无益于揭示目标场地的污染状况和环境风险。另一方面,39项常规指标中仅包含4项挥发性有机物(三氯甲烷、四氯化碳、苯、甲苯)和6项有毒重金属(汞、砷、硒、镉、六价铬、铅)<sup>[8]</sup>,而工业污染场地常见的挥发性有机物和重金属污染物种类远多于这4+6种。因此,若仅监测这39项很可能会遗漏地下水中实际存在的污

染物。

综上所述,以《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的39项常规指标作为场地初步调查中的地下水监测因子,既会遗漏很多工业场地常见的污染物,又会额外检测很多与污染场地不相关的指标。因此,建议生态环境管理部门尽快出台针对污染场地的地下水监测因子清单,以期涵盖工业场地的主要污染物,且排除非必要的监测因子,从而以较低的成本实现对于工业场地地下水环境质量的科学调查和精准评估。

2)《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的标准值不完全适用于污染场地管理。《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)是由原国土资源部联合水利部共同制定,用于评价地下水本身质量,而非用于衡量人类活动对地下水质量的影响。地下水质量的影响因素复杂,包含天然成因和人为成因。地下水在自然循环过程中与岩土介质发生水-岩相互作用,在自然状态下经过漫长的地质和地球化学作用会形成有害物超标的天然劣质地下水(天然成因)<sup>[9]</sup>。人类的工农业生产活动排放的污染物也会导致地下水中有毒物质超标(人为成因)。污染场地管理则主要关注人为成因导致的场地尺度地下水污染,而该标准更多关注综合了天然成因和人为成因的区域大尺度地下水质量。因此,标准中每项指标的标准值并不完全适用于污染场地环境管理工作。

《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)提出的5种类型地下水的划分主要依据地下水的水质和使用功能,而非以环境风险(人体健康风险)为主要出发点。以目前我国场地调查和评估主要参照的Ⅲ类和Ⅳ类地下水标准为例:该标准对Ⅲ类地下水的描述是“地下水化学组分含量中等,以GB 5749-2006为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水”;Ⅳ类地下水是“地下水化学组分含量中等,以GB 5749-2006为依据,主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水”<sup>[8]</sup>。这些功能与污染场地的环境风险(人体健康风险)并无直接关联,以此作为污染场地环境管理的依据并不科学,存在部分指标偏宽松、另一部分指标过于严格的可能。

另外,《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的93项指标(包括39项常规指标和54项非常规指标)遗漏了一些工业场地应重点关注的污染物。如未给出总石油烃、甲基叔丁基醚、苯胺类、1,2-二氯乙烷、氯乙烷、1,2,3-三氯丙烷、萘、菲、芘、蒽、2-甲基萘、苯并(a)蒽、苯并(b)蒽、苯并(a)芘等指标的标准值,在调查评估时只能参考国内地方标准或国外标准,不利于全国污染场地环境管理工作的标准统一。

因此,建议生态环境管理部门针对污染场地来制定地下水环境质量标准,指标项目的选取及各指标标准值的制定应借鉴国内外相关环境质量标准的制定思路,并结合我国污染场地地下水特征污染物类型,以及全国土壤污染状况详查工作的成果来进行。

3)地下水采样监测的规范性仍需加强。2020年,生态环境部发布了新版《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020)。该技术指南对地下水环境监测的点位布设、监测井建设与管理、样品采集与保存、监测项目和分析方法、监测数据处理、质量保证和质量控制、资料整理等方面提出了明确要求<sup>[10]</sup>。另外,生态环境部制定的《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019)<sup>[11]</sup>和《场地土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》(HJ 1019-2019)<sup>[12]</sup>也对污染场地地下水监测提出了相应的技术要求。

然而,在开展实际监测时,部分单位并不能严格遵守这些指南的技术要求。常见问题包括:监测井数量不足;监测井位置选取不合理;监测井建设不够规范;监测井建设信息和记录表缺失;洗井操作不规范或未进行洗井操作;洗井记录缺失;采样操作不规范;缺少现场参数的测试和记录等。监测点位的布设会显著影响监测数据和调查报告的质量。调查单位应严格按照HJ 164-2020、HJ 25.2-2019、HJ 1019-2019等技术规范的要求并结合场地实际的水文地质状况合理选取监测点位。地下水垂向的采样位置会显著影响监测结果,这一点国内的从业单位关注较少。国外学者研究发现,若含水层较厚,则饱水带中不同深度的地下水污染物浓度可能差别很大,即采样点的纵向垂直相差5~10 m,其污染物浓度可能会差2~3个数量级<sup>[13]</sup>。因此,对于进入详细调查阶段的场地,若第一层含水层厚度较大(如大于10 m),应考虑进行多层次的地下水采样,至少在重

污染区域的点位上应考虑多层次采样,以探明污染物在饱水带中的垂向分布。

## 参 考 文 献

- [1] 马杰. 我国挥发性有机污染地块调查评估中存在的问题及对策建议[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(1): 3-7.
- [2] 马杰. 污染场地VOCs蒸气入侵风险评估与管控[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] MA J, MCHUGH T, BECKLEY L, et al. Vapor intrusion investigations and decision-making: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7050-7069.
- [4] VERGINELLI I, YAO Y. A review of recent vapor intrusion modeling work[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2021, 41(2): 138-144.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块地下水修复和风险管控技术导则(HJ 25.6-2019)[S][M]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [6] 马杰. 土壤气监测在污染地块调查评估中的优势、局限及解决思路[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(8): 2531-2535.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(HJ 25.5-2018)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国国土资源部. GB/T 14848-2017地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] WANG Y X, LI J X, MA T, et al. Genesis of geogenic contaminated groundwater: As, F and I[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 51(24): 2895-2933.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. HJ/T 164-2020 地下水环境监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则(HJ 25.2-2019)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则(HJ 1019-2019)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [13] MACKAY D, HATHAWAY E, DE SIEYES N, et al. Comparing natural source zone depletion pathways at a fuel release site[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2018, 38(2): 24-39.

## Significance, problems and countermeasures of groundwater monitoring for contaminated site management

MA Jie\*

State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Corresponding author, E-mail: rubpmj@sina.com

**Abstract** The phenomenon of "heavy soil and light water" has long existed in polluted site remediation industry in China. However, soil and groundwater constitute the organic and unified underground environment together, and there is a close material exchange between soil and groundwater. Therefore, a full understanding of groundwater contamination condition is critical for contaminated site management and safe redevelopment of post-remediation land. Based on the four functions of groundwater monitoring in the whole environmental management of contaminated sites, in this paper, the problems existing in groundwater monitoring of contaminated sites in China were analyzed, and the solutions and policy suggestions were put forward in order to provide reference for groundwater control in contaminated site remediation industry in China.

**Keywords** contaminated site; site investigation; risk assessment; soil; groundwater; aquifer; saturated zone