



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.202007080

中图分类号 X53

文献标识码 A

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.

MA Jie. Problems and suggestion for investigation and risk assessment of sites impacted by volatile organic compounds in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 3-7.

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

马杰*

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

作者简介: 马杰(1986—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 污染场地调查评估与修复。E-mail: rubpmj@sina.com

*通信作者

摘要 基于多年研究和实践经验, 总结了我国挥发性有机污染地块调查评估方面存在的 6 个问题。从科学机制角度, 通过分析实际地块案例, 阐述了产生这些问题的原因。最后, 针对这 6 方面的问题分别提出了改进建议, 以期为我国 VOCs 类污染地块调查评估和修复治理提供参考。

关键词 污染地块; 场地调查; 风险评估; 场地修复; 挥发性有机物; 环境管理

经过十几年的探索, 我国已初步建立起污染地块环境管理的制度框架^[1-5]。近年来, 生态环境部陆续发布了系列政策文件和技术导则, 指导和规范了我国污染地块调查评估与修复管控工作的开展^[6-11]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是污染地块中最常见、最重要的一类污染物。VOCs 具有化学性质活泼、易挥发、易迁移等特点, 导致其调查评估的技术难度较大。越来越多的实践经验表明: 我国现在通行的地块调查评估方法对于 VOCs 的特殊性考虑不足, 存在可以改善的空间^[2]。本文选取 6 个主要问题进行讨论, 并提出改进建议。

1 土壤污染物浓度数据不足以评估地块 VOCs 的污染状况和环境风险

我国的地块调查和风险评估工作一般以污染物的土壤浓度数据为主要依据, 辅以地下水浓度数据。然而, 大量科学研究和实践经验表明, VOCs 的土壤浓度数据无法完整地反映地层中 VOCs 的污染分布、污染程度和环境风险, 特别是呼吸暴露风险^[12-14]。这里列举 3 个实际地块案例予以说明。

案例 1: 美国丹佛市的 Redfield 地块是世界上第一个被报道的大型蒸气入侵地块, 美国环保署(US EPA)在 1993—2003 年期间对其进行过 3 轮土壤调查, 钻取了 150 多个土孔, 采集了数百个土壤样品。结果显示: 所有污染物的土壤浓度均未超标, 然而在地下水中却发现了一个长达几千米的氯代烃污染羽; 污染羽中的 1,1-二氯乙烯和三氯乙烯通过挥发侵入了地表 400 多栋住宅, 导致其室内空气浓度超过了人体健康标准(详细情况参见《污染场地 VOCs 蒸气入侵风险评估与管控》^[14])

收稿日期: 2020-07-12; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21878332); 北京市科技新星计划项目(Z181100006218088); 中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0607)

中的 Redfield 案例)。

案例 2: 我国北方某化工厂的土壤中的二氯甲烷、氯仿、苯的浓度都低于 GB 366000 筛选值, 但在同一点位 3 种化合物的土壤气浓度却分别高达 3.23×10^4 、 12.8×10^4 、 $88.8 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过 US EPA 的土壤气筛选值 3~4 个数量级, 可能存在较高的呼吸暴露风险。

案例 3: 在我国某农药厂, 部分堆存在地面的异位土壤及地层中的原位土壤均散发出明显的刺激性气味。调查发现, 这些土壤中检出的化合物浓度均低于 GB366000 筛选值, 而土壤气中却检测出了 60 多种 VOCs 和半挥发性有机物 (semi-volatile organic compounds, SVOCs), 每立方米中部分 VOCs 高达几万微克, 远超 US EPA 的筛选值。

以上案例说明, 仅凭土壤监测数据可能无法完整地反映地层中 VOCs 的污染状况及环境风险^[15]。导致这一现象的原因主要有 3 方面: 第一, VOCs 在土壤中的分布具有较大的空间非均质性, 有限的土壤钻孔未必能够揭示真正的高浓度污染源, 对于复杂地块更是这样; 第二, VOCs 在包气带中主要以吸附态、非水相液体 (non-aqueous phase liquid, NAPL)、土壤水、土壤气 4 种形态赋存, 土壤采样无法捕获到气相中的 VOCs, 仅能反映前 3 个相态的污染情况。然而, 土壤蒸气中的 VOCs 未必来源于紧邻的土壤, 往往由重污染区域 VOCs 气体迁移过来。前面列举北方某化工厂的案例可能就属于这种情况, 污染物的土壤浓度全部达标, 但土壤气中却含有高浓度的 VOCs 的情况^[12, 16]; 第三, 尽管在采样和运输过程中采用了甲醇保护等措施, 土壤样品中的 VOCs 还是会存在不同程度的挥发损失, 导致采样结果偏低, 甚至完全失真^[12]。

建议对于地块中 VOCs 调查评估应更加重视地下水数据的分析解读, 并且增加土壤气的监测工作; 对于复杂地块, 还可以考虑使用地表通量箱监测等新兴的 VOCs 调查技术^[17]。

2 地下水监测数据的重要性未得到应有的重视

尽管不少学者呼吁要重视地下水污染, 但在实际项目中土壤和地下水数据往往还是分别被讨论分析。两者的关联性尚未引起足够的重视, 部分风险评估报告甚至以“不存在饮用地下水暴露途径”为由弱化甚至忽视超标的地下水数据。在实际地层中, 土壤和地下水之间存在着频繁的物质交换, 严重的地下水污染反映了潜在的土壤污染。由于土壤中污染分布具有较高的空间非均质性, 有限的土壤钻孔可能会遗漏实际的污染源区域, 进而造成假阴性结果。与土壤不同, 地下水是流动的, 污染物在地下水中更容易扩散和迁移, 因此, 地下水监测数据更容易揭露地层中的污染, 遗漏污染源区的概率相对也较低。

除了定性判断污染是否存在之外, 地下水监测数据还可用于半定量判断土壤污染的程度。如果污染物在地层中处于相平衡状态, 利用地下水中污染物的浓度可以推算出土壤相应污染物的浓度, 进而能够半定量地指示出土壤的污染程度。另外, 基于地下水 VOCs 浓度还可以判断地层中是否存在 NAPL 相^[14]。

某些地块中还存在土壤中 VOCs 的污染程度较轻, 地下水中却存在着高浓度的污染物。卤代烃污染地块更容易出现这种现象。对于这类地块, 一定要予以足够重视。当地下水中检出了高浓度的污染物, 则说明地层已受到了严重污染。然而, 由于污染物在土壤中分布的空间非均质性, 有限的土壤钻孔可能并未探测到重污染区域。

建议应该加强地下水调查工作, 提升对地下水监测数据的分析解读。地下水中检出高浓度的 VOCs 意味着地层中可能存在较严重的污染, 甚至是 NAPL 相污染源, 因此, 对这类地块应给予足够的重视。

3 土壤气监测尚未成为污染地块 VOCs 调查的常规内容

在发达国家, 土壤气监测是地块 VOCs 调查的常规工作内容^[18-19]。吸入受污染气体是污染地块

中 VOCs 最主要的人体暴露途径^[17]，而 VOCs 是以气态的形式从地下污染源传输到地表的，因此，土壤气监测数据是国外进行 VOCs 风险评估的重要依据^[12]。另外，由于土壤气也是一种流体，VOCs 在土壤气中也能够自由地迁移和扩散，所以土壤气监测比土壤监测更容易揭露地层中的 VOCs 污染。前文提及的我国南方某农药厂的案例就佐证了这一观点。在该地块，对于有明显刺激性气味的土壤样品，土壤监测未发现任何超标的污染物，但在土壤气中却检出了超过 60 种 VOCs 和 SVOCs；而且很多 VOCs 的浓度都远超 US EPA 的筛选值。因此，土壤气浓度是指示地块 VOCs 污染程度和环境风险的重要指标。国内从业者对于土壤气监测比较陌生，随着土壤气采样技术导则的出台，土壤气监测会逐渐普及。

由于兴建建筑之后土壤气浓度会发生变化，似乎无法根据土壤气浓度确定修复目标值和修复范围，因此，通常认为以棕地再开发为目的的地块调查项目中进行土壤气监测的意义不大。然而，这种观点颠倒了地块调查评估与划定修复范围之间的主次关系。调查评估的目标是要确定该地块是否存在污染和环境风险，因为只有先解决这个问题，才能确定是否要进行地块修复，以及如何划定修复范围。如前文所述，土壤浓度数据并不足以表征地块 VOCs 的污染分布和污染程度，存在遗漏重污染源区域的可能。如果无法准确地评估实际地块的污染程度以及重污染区域的分布，那么计算出的修复目标值以及划定的修复范围可靠性和实际意义就较低，也会为后续的地块修复和房地产开发留下隐患。

4 现行调查评估可能不足以准确反映大型复杂地块的污染状况

对绝大部分地块来说，我国现行的技术规范可实现以较低的经济成本和较快的速度完成调查评估的任务，以实现环境保护和经济发展的平衡。然而，对于少数规模较大、地质和水文地质状况复杂、污染较重的地块，若调查评估仅仅满足完成国家导则要求的“规定动作”，可能并不足以准确反映地层中实际的污染分布、污染程度和环境风险。政府部门发布的技术导则具有通用性和普适性，其制定过程会尽量照顾到我国不同地区的经济社会发展情况，以及不同规模和复杂程度的地块管理需求，理论上需要涵盖所有的行业类型和常见的污染物。由于污染地块的复杂性，要求一份技术导则能够满足所有地块的需求实际上并不现实，从业者对此应该有清醒的认识。

对于大型复杂地块的调查评估，简单套用技术导则很有可能无法准确反映地块的污染状况，甚至存在遗漏重污染区域的可能。对于这类地块，除导则中规定的必须完成的“规定动作”外，还应根据实际情况增加一些“自选动作”，以科学精准地查明实际的污染状况。对于 VOCs 类地块，可采用的自选动作包括但不限于：1) 采用新兴调查技术(同位素技术、分子指纹技术、被动采样、通量箱、示踪剂等^[14, 17])；2) 在重点区域有针对性地增加采样数量和频率；3) 增加污染源迁移转化的模型模拟预测等。

充分细致的调查工作可为后续的修复/风险管控提供坚实的数据支撑。在美国、加拿大、澳大利亚等，一些大型复杂地块的污染状况调查需要花费数年时间，其采样密度、使用的调查技术、数据分析的非常深入。近年来，我国土地开发的周期加快，业主并未重视地块调查工作，常要求调查单位以很短的时间和很低的成本完成调查。这会给后续的地块修复和土地开发工作留下隐患，建议相关管理部门从顶层设计到具体管理制度上，将大型复杂地块的管理与低风险地块的管理区别开来。

5 对 VOCs 监测数据的时间和空间非均质性认识不足

与重金属和 SVOCs 不同，VOCs 的迁移能力非常强，可以随着地下水或土壤气在饱水带或包气带自由迁移。因此，VOCs 在地层中的分布往往具有较高的时间和空间非均质性。国内现行的技术评估方法对于污染分布的空间非均质性已经有一定的考虑，但对时间非均质性的关注度尚存不

足。然而, 地下水位波动、气温变化、大气压波动、降水、刮风都有可能引起地层中 VOCs 的分布和浓度发生变化。因此, 对于高风险地块, 核心的监测指标有必要采用多轮次采样的策略, 以期更好地反映监测数据的时间非均质性以及评估其长期暴露风险。新近的研究发现, 被动采样技术可以较低的经济和人力成本实现长周期采样, 这样有助于平抑待测物浓度的时间波动, 也能够更好地表征污染物的长期暴露风险^[20-21]。

6 NAPL 相污染源的调查尚未得到重视

NAPL 相污染源会源源不断地释放出溶解态和气态污染物, 可导致地下水和土壤持续地受到污染。若地层中存在 NAPL, 且修复工程中未能将其彻底清除, 那么即使土壤和地下水修复达标, 污染物仍然会源源不断地从 NAPL 污染源释放出来, 并随地下水和土壤气的迁移扩散, 导致修复干净的土壤和地下水被重新污染。地层中是否存在 NAPL 直接影响后续的地块修复和风险管控方案的制定和最终实施效果。在美国、加拿大、英国等国的石油污染地块管理中, 若地层中存在轻非水相液体 (light non-aqueous phase liquid, LNAPL), 则其调查评估目标、调查方法与流程、风险筛查标准、修复目标和内容、修复技术的选择都与仅存在溶解态石油烃时存在很大的差异。对于卤代烃污染地块, 虽然重非水相液体 (dense non-aqueous phase liquid, DNAPL) 的溯源至今仍然是一个难题, 但是, 判断 DNAPL 是否存在并尽量找到 DNAPL 污染源仍然是地块调查工作的核心任务之一。

目前, 我国的地块调查工作对于探明 NAPL 相污染源这一目标尚不够重视。大部分调查报告并未对目标地块是否存在 NAPL 给出明确的结论。对于污染程度较轻的地块, 存在 NAPL 的可能性较低, 可以不进行 NAPL 溯源。然而, 有机物污染程度较重的地块其地层中往往都存在 NAPL 相, 对于大型地块而言甚至很可能存在多处 NAPL 源。因此, 对于有机物污染程度较重的地块应该将 NAPL 调查规定为必须完成的工作。国外有一系列成熟的 NAPL 调查技术和设备 (如岩芯取样法 (intact soil coring)、激光荧光测井技术 (laser-induced fluorescence logging)、分区单元间跟踪程序测试技术 (partitioning interwell tracer testing)、石油组学技术, 以及薄膜界面探测器 (membrane interface probe)、光学图像分析器 (optical image profiler) 等设备), 适用于不同种类的污染物和不同的地块条件。笔者建议在重污染地块尝试推广这些新型调查技术及设备。

7 结语

笔者探讨了我国 VOCs 污染地块调查评估实践中存在的 6 方面的问题, 希望能引起政府管理部门和从业单位的重视, 共同推动我国污染地块调查评估工作向更科学、更精准的方向迈进。由于 VOCs 是工业污染地块中最常见的污染物, 其赋存分布和迁移转化行为与重金属、SVOCs 等其他类型污染物有着显著的差异, 因此, 建议生态环境部尽快制定一套专门针对 VOCs 类污染地块调查评估的技术导则, 以进一步规范此类地块的修复及管理。

参考文献

- [1] 骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(3): 1-6.
- [2] 姜林, 樊艳玲, 钟茂生, 等. 我国污染场地管理技术标准体系探讨[J]. *环境保护*, 2017, 45(9): 38-43.
- [3] 周友亚, 姜林, 张超艳, 等. 我国污染场地风险评估发展历程概述[J]. *环境保护*, 2019, 47(8): 34-38.
- [4] 龙涛. 基于风险管控的污染地块修复模式概述[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(4): 36-39.
- [5] 尧一骏. 我国污染场地治理与风险评估[J]. *环境保护*, 2016, 44(20): 25-28.
- [6] 生态环境部. 建设用地土壤污染状况调查技术导则: HJ 25.1-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [7] 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.

- [8] 生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则: HJ 25.3-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [9] 生态环境部. 建设用地土壤修复技术导则: HJ 25.4-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [10] 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.
- [11] 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]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [12] MA J, LAHVIS M A. Rationale for soil gas sampling to improve vapor intrusion risk assessment in China[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 2020, 40(1): 12-13.
- [13] MCALARY T A, PROVOOST J, DAWSON H E. Vapor Intrusion[M]//SWARTJES F A. *Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application*. Springer. 2011: 409-453.
- [14] 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.
- [15] MA J, JIANG L, LAHVIS M A. Vapor intrusion management in China: Lessons learned from the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3338-3339.
- [16] ZHANG R, JIANG L, ZHONG M, et al. Applicability of soil concentration for VOC-contaminated site assessments explored using field data from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(2): 789-797.
- [17] MA J, MCHUGH T, BECKLEY L, et al. Vapor intrusion investigations and decision-making: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7050-69.
- [18] USEPA. OSWER technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air (OSWER Publication 9200.2-154)[R]. Washington D C USA: U.S. Environmental Protection Agency, 2015.
- [19] USEPA. Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites (EPA 510-R-15-001)[R]. Washington D C USA: U.S. Environmental Protection Agency, 2015.
- [20] 马杰. 污染场地土壤气被动采样技术研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 494-502.
- [21] 姜林, 赵莹, 钟茂生, 等. 污染场地土壤中VOCs定量被动采样技术研究及应用[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(11): 1746-1753.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

Problems and suggestion for investigation and risk assessment of sites impacted by volatile organic compounds in China

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 Based on years of experiences in scientific research and engineering practices in this area, this paper summarized six key problems that current national guidelines have for VOC site investigation and risk assessment. The scientific reasons that cause the problems were explained and discussed. Case studies from both China and abroad were provided to illustrate potential negative impacts associated with these problems. Suggestions to address these problems were also provided.

Keywords contaminated site; site investigation; risk assessment; site remediation; volatile organic compounds; environmental management