



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.202011091

中图分类号 X53

文献标识码 A

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.

MA Jie. Soil gas monitoring for site investigation and risk assessment: Advantages, challenges and solutions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2531-2535.

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

马杰^{1,*}

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: 污染地块调查评估与修复。E-mail: rubpmj@sina.com

*通信作者

摘 要 目前, 我国污染地块调查评估以土壤监测为主, 辅以地下水监测。这套方法对于挥发性有机物(VOCs)的特殊性考虑不足, 可能出现遗漏污染区域的可能性。与土壤监测相比, 土壤气监测在 VOCs 污染地块调查评估中具有可捕捉 VOCs 污染区域的能力更强, 能更准确反映 VOCs 的气态扩散迁移过程和呼吸暴露风险, 以及长期监测成本较低等优势, 故有必要将土壤气监测作为 VOCs 污染地块调查评估的常规工作内容。针对土壤气监测在国内推广应用中仍受到缺乏土壤气采样技术规范、分析检测标准方法、土壤气环境质量标准或风险筛选值及相应的数据分析方法等问题的局限, 提出相应的解决思路以供参考。

关键词 污染场地; 地块调查; 风险评估; 土壤气; 挥发性有机物; 土壤; 地下水

从地表向下一直到毛管层上方的土壤和岩石空隙中未被水充满的空间中含有的气体被称为土壤气^[1]。按照采样位置, 土壤气可分为浅层土壤气、深层土壤气、底板下土壤气 3 类。浅层土壤气是指深度较浅的土壤孔隙中的气体样品; 深层土壤气又叫近污染源土壤气, 是指污染源附近土壤孔隙中的气体样品; 底板下土壤气是指建筑物底板下方土壤孔隙中的气体样品。

美国、加拿大、澳大利亚、英国等国家在挥发性有机污染物 (volatile organic compounds, VOCs) 地块调查评估中将土壤气作为常规监测指标, 并发布了一系列相关土壤气采样、监测、数据分析的技术标准^[1-2]。在我国建设用地环境管理领域, 土壤气采样监测尚处于起步阶段, 缺乏专门的技术标准^[3]。本文探讨在 VOCs 污染地块调查中推行土壤气监测的必要性、应用范围, 以及现阶段在我国污染地块调查中推广该技术的局限, 提出相应解决思路以供参考。

1 土壤气采样方法

土壤气体样品的采集方式分为主动采样和被动式采样。主动式土壤气采样需要建设土壤气监测井, 常见的监测井包括 3 类: 1) 钻孔埋管式监测井; 2) 钻杆直插式监测井; 3) 由地下水井改装成的土壤气井^[1] (见图 1)。钻孔埋管井是使用最广泛的土壤气采样井, 其可靠性和采样精密度较

收稿日期: 2020-11-17; 录用日期: 2021-06-26

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); 中石油科技创新基金资助项目 (2018D-5007-0607)

高,可采集较深的土壤气样品。然而,钻孔埋管式监测井的建井流程较复杂,时间和经济成本也较高。钻杆直插井的建井速度较快,经济成本较低,但其采样深度较浅(通常不超过4 m),而且通常无法长期使用。地下水井改装的土壤气井由于筛管位置和长度的问题,用于土壤气采样时,采样精度和代表性较差,一般不推荐使用。

土壤气主动采样中,常见的样品保存器具有3种:吸附管、采样罐、气袋(见图2)。气袋常用于现场快速筛查,而送检样品一般用吸附管或采样罐收集。采样罐在北美地区较常用,而吸附管在欧洲更常用。一般认为,采样罐法的采样效果更好,但该方法采集过程中可能存在罐污染,影响采样精度,且会导致采样罐报废^[4],故吸附管法在我国更为常用。被动式土壤气样品采集指在地表下放置吸附剂,通过扩散和吸附机制将污染物收集^[5-6]。被动采样技术仍处于从研究向应用过渡的阶段,已有一些场地实测研究证实了该方法的可靠性。然而尚无国家发布官方土壤气被动采样技术规范,故其大规模推广应用受到限制。

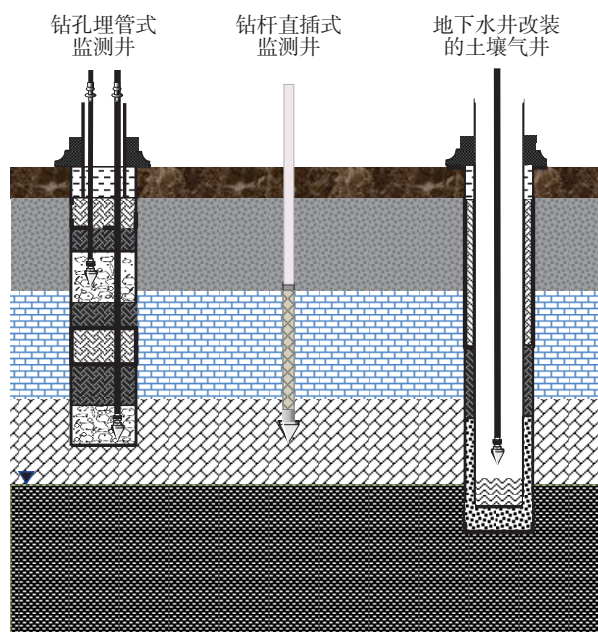


图1 3种类型的土壤气监测井

Fig. 1 Three types of soil gas monitoring wells



图2 3种土壤气样品的常用保存器具

Fig. 2 Three types of soil gas storage tools

2 土壤气监测相比土壤监测的优势

目前,我国污染地块调查评估工作主要依据生态环境部修订的《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1-2019)、《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)、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)这3项技术指南开展。这套方法以土壤监测为主要工作,并辅以地下水监测。然而,这套方法对VOCs理化性质和环境行为的特殊性考虑不足,可能会遗漏掉某些污染区域,在实践中出现过“土壤浓度不超标,但存在明显异味”或“土壤浓度不超标,但土壤气浓度超标”等现象^[3,7]。因此,与土壤监测相比,土壤气监测具有以下优势。

1) 捕捉VOCs污染区域的能力更强。VOCs在地层中的分布空间异质性较大,有限的土壤监测点位无法完整反映地层中VOCs的污染分布和环境风险。土壤气是一种流体,气态VOCs在土壤气

中通过扩散、对流等物理机制不断迁移,因此,VOCs 土壤气浓度的空间异质性往往小于其土壤浓度。特别是对于离散点状分布的小规模污染源,通行的 40 m×40 m 网格布点很容易遗漏这类污染源。而由于 VOCs 存在扩散迁移特性,通过土壤气监测捕捉到这类污染源的概率要高很多。笔者在南方某农药厂地块调查中发现,部分堆存在地面的异位土壤及地层原位土壤具有明显刺激性气味,且土壤气监测发现了 60 多种 VOCs 和半挥发性有机物(SVOCs)(部分 VOCs 的质量浓度高达几万 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),而土壤检测报告中污染物浓度均低于 GB 36600-2018 的风险筛选值。这个案例反映出土壤检测很有可能遗漏掉地层中的 VOCs 污染源,产生假阴性错误。

2) 更准确地反映 VOCs 的气态扩散迁移过程和呼吸暴露风险。呼吸暴露是地块 VOCs 最重要的人体暴露途径。呼吸暴露定量风险评估中最终决定暴露风险的是气态 VOCs 的暴露量^[1-2]。对于 VOCs 风险的评估,国内通行做法是以《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)指南中的推荐方法,基于相平衡假设通过 VOCs 土壤或地下水浓度计算 VOCs 土壤气的浓度,然后根据 VOCs 迁移模型(分室内、室外)预测空气中的 VOCs 浓度。已有研究证实,基于相平衡计算出的 VOCs 土壤气浓度与实测数据差异较大^[7-9]。因此,VOCs 土壤气监测得到的数据,可更准确反映地层中气态 VOCs 的分布、气相迁移过程及呼吸暴露风险^[8]。

3) 长期监测成本较低。除土壤气监测井的建设有一定经济成本外,土壤气的采样监测成本很低。进行长期监测时,土壤气监测比反复钻孔的土壤监测成本更低,且效果更好。因此,土壤气监测在企业自行监测及场地长期风险管控方面均能发挥作用。

3 土壤气监测在地块调查评估中的应用方式

在挥发性有机污染地块的调查和管理工作中,土壤气监测的应用方式有以下 6 个方面: 1) 土壤气监测数据可作为判断地块污染程度的直接依据,据此决定目标地块是否需要详细调查、风险评估、修复治理; 2) 土壤气监测数据可作为地下污染溯源的关键指标; 3) 土壤气浓度数据可作为输入参数代入风险评估模型,进行呼吸摄入量、致癌风险及非致癌风险的定量风险评估计算; 4) 土壤气监测可在地块修复工程实施及修复效果评估中为修复工程过程监管和修复效果评估提供直接判定依据; 5) 可帮助涉及挥发类有机物的在产企业自行监测、预警挥发性有机物的泄漏; 6) 在污染地块长期风险管控中,土壤气监测可指示土壤和地下水污染状况、环境风险及其变化趋势。

4 现阶段土壤气监测在我国推广应用中的局限及解决思路

1) 缺乏土壤气采样技术规范。土壤气采样过程对于监测数据的影响较大,采样过程不规范会降低监测数据的精确性。土壤气监测在国内尚处于起步阶段,相关采样技术规范缺失,国内调查评估单位对于土壤气采样监测经验不足,限制了土壤气监测的推广应用。建议国家尽快出台土壤气采样技术指南,为污染地块土壤气采样监测提供技术依据。

2) 缺乏专门针对污染地块土壤气 VOCs 的分析检测标准方法。目前,土壤气监测主要借鉴《环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法》(HJ 644-2013)和《环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759-2015)等环境空气检测方法,并没有专门针对污染地块气体 VOCs 的标准监测方法。然而,污染地块调查中的常见 VOCs 与环境空气监测的 VOCs 种类差异较大。污染地块中很多常见 VOCs 的检测方法并未被环境空气检测方法所涵盖。例如,污染地块调查中最常用的《环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法》(HJ 644-2013)涵盖了 35 种 VOCs 的检测方法,但并不包括氯乙烯、反式-1,2-二氯乙烯、萘、异丙苯、三溴甲烷、1,1,2-三氯乙烷、六氯乙烷、三氯丙烷类、1-溴-2-氯乙烷、一溴二氯甲烷等污染地块可能存在的 VOCs。另外,该标准也不包括可能引起恶臭和异味问题的含硫化合物(甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、乙硫醇、二硫化碳、硫化氢)、含氮化合物(甲胺、二甲胺、三甲胺、乙

胺、氨)和挥发性农药。因此,建议相关部门尽快出台针对污染地块气体样品(土壤气、室内室外空气)的检测方法,以覆盖污染地块可能存在的挥发性和半挥发性有机物。

3) 缺乏土壤气环境质量标准或风险筛选值。环境质量标准是进行管理的重要依据。目前,污染地块调查评估中土壤监测结果主要参考《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)风险筛选值,地下水监测结果主要参考《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017),但尚无针对土壤气的环境质量标准^[10]。目前,北京市地方标准《污染场地挥发性有机物调查与风险评估技术导则》(DB 11T-1278-2015)是国内唯一能参考的土壤气 VOCs 质量标准,但其中仅包括 15 种 VOCs 的监测方法,无法涵盖污染地块中部分常见 VOCs。因此,建议相关部门尽快出台涵盖面更广的污染地块土壤气 VOCs 筛选值标准。

4) 缺乏土壤气监测结果的分析方法。国内多数调查评估单位对于土壤气监测结果分析方法的掌握还很有限。实际上,土壤气监测数据中蕴含丰富的污染地块特征信息,利用数学模型等多种分析方法进行数据分析与解读,可帮助了解地层污染状况、评估地块环境风险、预警可能发生的泄露污染等重要信息。建议相关部门尽快出台污染地块土壤气 VOCs 风险评估技术指南,为合理使用和科学分析土壤气监测数据提供依据。

参 考 文 献

- [1] 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.
 - [2] 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.
 - [3] 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.
 - [4] MCHUGH T E, VILLARREAL C, BECKLEY L M, et al. Evidence of canister contamination causing false positive detections in vapor intrusion investigation results[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2018, 27(8): 748-755.
 - [5] 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.
 - [6] 姜林, 赵莹, 钟茂生, 等. 污染场地土壤气中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.
 - [7] 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.
 - [8] 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.
 - [9] 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.
 - [10] 钟茂生, 姜林, 贾晓洋, 等. 蒸气入侵暴露情景下土壤气筛选值推导与比较[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(9): 979-988.
- (责任编辑: 靳炜)

Soil gas monitoring for site investigation and risk assessment: Advantages, challenges and solutions

MA Jie^{1,*}

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 Current contaminated site investigation and risk assessment in China rely on soil monitoring, supplemented by groundwater monitoring. However, this method neglects the specificity of volatile organic compounds (VOCs) thus might miss some contaminated zones. In contrast to soil monitoring, soil gas monitoring has the following three advantages: (1) more capable of capturing highly contaminated zones by VOCs, (2) more effective in reflecting gas-phase diffusive transport and human respiratory exposure risk, and (3) less expensive for long term monitoring. Therefore, soil gas monitoring should be part of normal site investigation and risk assessment for VOC-impacted sites. However, there are four challenges associated with the application of soil gas monitoring in China: (1) lack of technical guidelines for soil gas sampling, (2) lack of standard analytical methods for soil gas VOCs at contaminated sites, (3) lack of environmental quality standard or risk control screening values of soil gas and (4) lack of analytical methods of soil gas monitoring data. Solutions to overcome these challenges are provided in this paper.

Keywords contaminated site; site investigation; risk assessment; soil gas; volatile organic compounds; soil; groundwater