



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.202303111 中图分类号 X53 文献标识码 A

马杰. 我国挥发性有机污染场地修复中存在的问题及对策建议[J]. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2444-2448. [MA Jie. Problems and suggestion for the remediation of volatile organic polluted sites in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2444-2448.]

# 我国挥发性有机污染场地修复中存在的问题及对策建议

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** 挥发性有机物(VOCs)具有易挥发、易迁移、环境归趋机制复杂、赋存分布异质性高的特点,这导致VOCs污染场地的修复治理难度较大。在进行房地产开发时,未经彻底修复的VOCs污染场地容易出现蒸气入侵等健康风险问题,甚至引发社会群体性事件,故VOCs污染场地修复是环境管理部门监管的重点。经过十几年的发展,我国场地修复工作在科学性和规范性方面取得了长足进步,但仍存在对VOCs特殊性考虑不足的问题。系统总结了我国VOCs污染场地修复管控及效果评估方面存在的5个问题,并揭示了这些问题背后的科学机制,结合国内外的工程实践经验和科学研究成果对这5个问题提出了有针对性的对策建议,以期为我国VOCs类污染场地修复治理和安全利用提供参考。

**关键词** 污染地块;土壤修复;地下水修复;风险管控;效果评估;场地修复

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是土壤和地下水污染物中环境风险高且修复难度大的一类物质,具有化学性质活泼、毒性高、易挥发、易迁移、难管控等特点<sup>[1]</sup>。若VOCs污染场地未修复彻底就进行再开发利用,可能会导致异味或者有毒VOCs的蒸气入侵问题,引发社会群体性事件,因此,污染场地的修复再利用是环境管理部门关注的重点。

为规范污染场地修复工作,生态环境部先后发布了《建设用地土壤修复技术导则》(HJ 25.4)、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5)、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6)、《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》等标准指南。这些指南文件有力指导了我国污染场地修复工作,显著提升了相关工作的规范性和科学性。本文拟探讨我国VOCs污染场地修复中仍存在的5个突出问题,剖析这些问题背后的科学机制并提出相应对策建议,以期为环境管理部门加强源头管控、制定针对高风险复杂场地修复治理及安全利用的政策提供参考。

## 1 污染修复深度止步于土壤层,忽视了基岩层中的污染

基岩层是位于土壤层之下地壳最表层的岩石层。基岩层经过漫长的风化作用会形成的疏松的、粗细不同的矿物颗粒的地表堆积体,从而形成了新土壤的母质,为土地提供未来的土壤矿物质成分。由于基岩的钻探成本高,大部分污染调查的深度往往止步于土壤层,然而泄漏后的污染物

收稿日期: 2023-03-20; 录用日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177042, 21878332); 中国石油大学(北京) 科研基金专项资金(2462022QNXZ006)

作者简介: 马杰(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, [rubpmj@sina.com](mailto:rubpmj@sina.com); <sup>✉</sup>通信作者

只要数量足够多会持续下渗进入基岩层。如果基岩层的风化程度高、裂隙发育好,大量的污染物则会赋存在基岩裂隙中<sup>[2]</sup>。特别是对于氯代烃类、氯苯类、多氯联苯、煤焦油、木馏油、重油等重非水相液体(dense nonaqueous phase liquids, DNAPL)类污染物,这类物质的密度比水大且与水不互溶, DNAPL在重力作用下不断地沿着土壤孔隙或者岩石裂隙下渗,直至遇到低渗层。对于DNAPL重污染场地,即使把表层污染土全部清挖仍可能有大量DNAPL残留在基岩中。随着地下水位的上下波动或水平流动或者土壤气挥发途径,赋存在基岩裂隙中的污染物会不断释放进入包气带和饱水带,最终导致以下问题:1)修复达标后回填的土壤再次被污染;2)地下水中相应污染浓度持续超标;3)土壤气污染以及蒸气入侵危害<sup>[1]</sup>。

因此,部分场地基岩层中赋存的污染物数量可能非常巨大,占比可能远超土壤层,若仅对土壤层进行修复会遗留大量污染物,而这些残留的污染物仍会随着地下水或者土壤气不断向外释放。如果在这类基岩中残存大量污染物的地块上建设新的建筑可能会出现蒸气入侵问题,我国已有实际案例,因此,建议监管部门和修复调查单位加强对这类特殊场地类型的关注,必要时应出台相应管理办法。

过去三十年来,美国、加拿大等国对于DNAPL污染基岩裂隙场地的调查和修复取得了一系列进展,但彻底修复这类场地仍极具挑战<sup>[2]</sup>。针对此问题,笔者提出如下建议:1)增强对于基岩裂隙污染调查和修复的科研投入;2)对于土壤层厚度薄且污染风险高的地块,场地调查和修复应充分关注基岩层;3)由于基岩层的调查和修复成本高,对于基岩层中污染严重的地块很难做到彻底修复,且其残留污染的环境风险仍然较高,因此对于这类地块的再开发利用应严加限制。。

## 2 表层土采样可能会高估 VOCs 污染土壤的修复效果

《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5)是我国污染土壤修复效果评估工作的主要参考依据。该导则详细规定了污染土壤分别采用异位修复、原位修复、风险管控等措施后的效果评估方法。该导则发布以来有效地规范了我国土壤修复评估工作的开展。对于采用异位修复的地块,该指南分别规定了基坑清理效果和异位修复后土壤堆体修复效果的布点采样评估方法。而针对基坑清理效果,则进一步规定了基坑底部和侧壁的布点数量和位置。《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》规定:“基坑坑底和侧壁的样品以去除杂质后的土壤表层样为主(0~20 cm),不排除深层采样”。受到时间和经济成本限制,很多修复效果评估项目通常只进行表层土壤采样。这对重金属和SVOCs污染场地问题不大,但对于VOCs污染土壤可能会高估其修复效果。对于大多数异位修复的污染场地,在基坑开挖后至效果评估采样之前可能会间隔几个月以上。而经过几个月的挥发和淋溶,表层土中的VOCs可能完全消散,但深层土中的VOCs却仍超标,故表层土采样可能会高估VOCs污染土壤的基坑清理效果。

针对上述问题,有两个解决思路。一是对涉及VOCs污染的基坑用手钻等方法进行深层土壤采样,采集埋深1 m甚至更深层的土壤。尽管这样操作比较繁琐、时间成本会增加,但能显著提高样品的代表性和评估结果的可靠性。二是抓大放小,即抓住污染场地中最易造成危害的情形。实际上,小尺度、离散且轻微超标的土壤污染点并不会造成严重的环境问题,最容易出问题的还是VOCs污染严重且规模较大的污染源。对于这类污染源地下水监测及土壤气监测能起到非常好的指示作用,具体可参考本系列专论前期论述<sup>[3-4]</sup>及本文下一部分。

## 3 修复效果评估中地下水监测数据的指示作用未受到足够重视

污染物在土壤中分布赋存具有高度非均质性,加上土壤采样可能存在VOCs挥发损失,故仅依赖土壤监测数据很可能遗漏VOCs重污染域<sup>[5]</sup>。实际上,由于土壤和地下水之间密切的物质交换及地下水较快的物质传输扩散能力,地下水监测比土壤监测更容易揭示地层中的VOCs污染<sup>[3]</sup>。相

对于多环芳烃等 SVOCs, 大部分 VOCs 的水溶性更高, 能更容易通过溶解进入地下水并形成地下水污染羽。地下水是一个拥有完整补-径-排系统的动态开放系统。若在地下水中检测到较高浓度的某种污染物, 则在地层中通常存在对应土壤污染源(这类土壤污染源未必是土壤, 可称为“含水层介质”, 为便于理解, 后文仍沿称其为“土壤”)。仅有地下水污染而不存在土壤污染源的可能性较低, 只有当一次性泄漏了有限体积的污染物且污染物不易吸附时才可能出现这种仅地下水污染而土壤未污染的情形。这种不易吸附污染物构成的地下水污染羽往往很快便被地下水稀释, 故此类特殊情况无法形成稳定持久的污染羽。反过来说, 若在地下水中持续监测到某种污染物, 这说明地下水中存在一个较持久的污染羽, 故地层中也必然存在一个持久的土壤污染源。因此, 地下水监测数据不仅直接反映了地下水的污染状况, 且间接反映土壤的污染状况。修复后的地下水出现浓度“拖尾”或者“反弹”现象实际上指示了土壤中存在未被清除的污染物。因此, 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6) 规定应对此类地块实施两年的监测期。

然而, 部分修复项目迫于土地开发压力, 对《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6) 执行不严格, 给地块的安全利用埋下隐患。针对上述问题, 笔者建议: 1) 在修复效果评估阶段应严格执行《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6) 的技术规定; 2) 对 VOCs 污染场地初步调查、详细调查、修复运行效果监测、修复效果评估等各个阶段中的地下水监测数据予以充分重视, 对于超标污染物甚至有检出污染物的监测数据要给予足够重视, 并进行深入分析; 3) 充分结合目标污染物的理化性质、环境归趋行为、分布赋存特征等信息挖掘监测数据背后的科学机制和指示意义。

#### 4 地下水修复目标值的制定流程不规范, 部分项目制定的修复目标值过高

生态环境部尚未颁布关于地下水修复目标值制定的技术指南。国内通行的做法是以《地下水质量标准》(GB/T 14848) 中的 III 类或者 IV 类水标准作为修复目标, 部分项目会通过地下水风险评估放宽修复目标。然而, 由于风险评估方法的不确定性或使用不规范, 少数基于风险评估制定的地下水修复目标值过高, 个别项目甚至达到可能存在自由相 (NAPL) 的程度。由于已有实践表明, 部分复杂场地的地下水修复很难完全达标<sup>[6]</sup>, 故适当放宽地下水修复目标值的观点具有一定合理性。值得注意的是, 我国的《地下水质量标准》(GB/T 14848) 中的 IV 类水标准比国外地下水标准更为宽松。以氯代烃 VOCs 为例, 《地下水质量标准》(GB/T 14848) 中的 IV 类水标准比美国场地修复常用的 MCL 标准普遍偏高 8~150 倍。因此, 我国 IV 类水不达标与美国 MCL 不达标所反映的地层中残余污染程度不在同一数量级。我国残余污染程度及其环境风险可能比美国高一个甚至几个数量级。国内有少数地块的地下水修复目标值可能比美国引起监管部门介入并触发修复项目的触发浓度还要高。这些不合理现象使得污染地块的安全利用存在较大隐患。

针对以上问题, 笔者提出如下 4 条建议。1) 应尽快制定污染场地地下水修复目标上限值制定指南。2) 该指南应该参考《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准》-GB36600 和《建设用地土壤污染修复目标值制定指南(试行)》的思路, 允许地下水修复目标值根据项目实际情况进行适度调整, 但不应超过一定上限, 即制定一个类似于 GB36600 中管制值的地下水修复目标上限值。3) 地下水修复目标上限值(或管制值)的制定不能只基于风险评估计算的结果, 而应该充分考虑每种污染物各自的理化性质、迁移转化归趋机制、环境赋存特征、国外同类标准的取值、经济社会承受能力等因素。笔者将在下一篇专论中对地下水修复目标上限值(管制值)的制定进行讨论。4) 我国的地下水风险评估方法仍需梳理完善。

#### 5 部分复杂污染场地修复后安全利用的不确定性较大

复杂污染场地是指水文地质条件复杂、污染程度重、环境危害大的场地。这类污染场地是各

国环境管理部门关注的重点<sup>[7]</sup>。这些国家过去四十年的场地修复实践表明,现有的修复技术对于少数复杂场地的修复效果不佳,在五十年甚至一百年内也很难将这些复杂场地的地下水修复至饮用水标准(Maximum Contaminant Level, MCL)<sup>[8]</sup>。1993年,美国环保署(USEPA)发布了“修复技术不可达”场地的评估指南<sup>[9]</sup>,我国学者近年来也启动这方面的研究<sup>[6]</sup>。修复不可达(Technical Impracticability)这一概念的提出承认了工程技术在解决复杂污染场地方面的局限性<sup>[9]</sup>,具有非常重要的积极意义。不过修复不可达不意味着“躺平”,对于美国提出的这一概念有以下4点值得注意。1)美国的技术不可达对标的是非常严苛的饮用水标准(MCL),而中国的地下水IV类水标准比美国MCL宽松,故中国与美国在地下水修复达标的难易程度方面并不相同。由于中国的标准比美国宽松,在美国技术不可达的场地在中国未必不可达。2)美国对于技术不可达场地的认定流程和后续管理仍存在争议,USEPA新出台的管理文件趋向于减少使用不可达豁免。2011年,USEPA在撤销了1995年发布的一项关于DNAPL场地技术不可达豁免的技术文件,并发表了一项澄清文件<sup>[10]</sup>。澄清文件认为“自1990年代开始对于DNAPL的场地调查和修复治理的科学理论和技术手段都取得了长足的进步”<sup>[10]</sup>。3)在美国,每年真正通过技术不可达评估得到豁免的场地数量很少,且近些年的审批日趋严格,数量呈减少的趋势。1988—2017年,美国超级基金场地中仅有96个场地得到了105份豁免许可(年均3.54个场地)<sup>[11]</sup>。其中,2012—2017年仅有11个场地得到了14份豁免许可(年均仅1.83个场地)<sup>[12]</sup>。4)获得豁免的场地并不意味着其环境风险可接受,也不意味场地可以结案而不进行后续管理,更不意味着场地可以不加限制地进行再开发利用。USEPA认为,即使目标场地得到豁免,仍需做到“阻止地下水污染羽的进一步扩散,切断残余污染物的潜在人体暴露途径,评估风险降低程度”,并“实施必要的风险管控措施以确保周边居民的健康和环境得到保护”<sup>[10]</sup>。截至2012年,1988至2011年获得豁免的96个场地中,69个场地仍在执行包括土地利用限制在内的制度控制,31个场地仍在继续进行污染源清挖,17个场地进行了源区的阻隔,11个场地在进行源修复。部分获得豁免的场地仍在进行抽出处理等修复措施。

复杂污染场地污染程度重、环境危害大,容易引起社会舆情事件,这是土壤地下水环境管理工作中的重点。作为环保细分行业,污染场地修复行业存在的基本逻辑前提是“污染土壤地下水未经修复治理会造成不可接受的环境危害和健康风险,退役工业污染场地需做到净地出让否则无法保障土地的安全利用”。另一方面,其他国家现有实践证明,即使不考虑经济成本,单从工程技术角度评估少数复杂污染场地的彻底修复在短时间内是无法实现的。我国近几年的实践情况也发现,极个别修复项目出现了修复完成地块在进行房地产开发后,因出现VOCs蒸气入侵或其他场地相关环境问题导致几十亿甚至上百亿的房地产项目无法交付使用,给地方政府带来了极大压力。

因此,并不是所有污染场地都能进行彻底修复。部分场地残余污染的风险超过了现阶段可接受的水平。对于这类高风险技术不可达地场地,如果盲目进行开发利用将带来不可预知的环境和健康风险。笔者提出如下2条建议。1)对于高风险复杂场地采用“暂时搁置”的思路,在现阶段禁止或至少做到严格限制其再开发应用,等将来修复管控技术突破或者对场地中污染物扩散迁移规律,以及长期环境风险有更加全面客观认识以后,再进行更加合理的规划利用。这一点已经在《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》中有所体现,但部分地方政府在执行阶段并没有全面落实规划的要求。2)如果高风险复杂场地周边存在敏感目标且场地内污染物存在迁移扩散风险时,应该加监测和预警,必要时采取有效的风险管控措施防止污染扩散,避免造成更大的环境危害。

## 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] NRC. Characterization, Modeling, Monitoring, and Remediation of Fractured Rock [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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): 2531-5.
- [5] 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.
- [6] 张丽娜, 姜林, 贾晓洋, 等. 地下水修复的技术不可达性及美国管理对策对我国的启示 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1120-30.
- [7] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 458-67.
- [8] NRC. Alternatives for Managing the Nation's Complex Contaminated Groundwater Sites [M]. Washington, DC, USA: The National Academies Press, 2013.
- [9] USEPA. Technical Impracticability: Guidance for Evaluating Technical Impracticability of Ground-Water Restoration (OSWER Directive 9234.2-25) [S]. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 1993.
- [10] USEPA. Clarification of OSWER 1995 Technical Impracticability Waiver Policy [R]. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [11] USEPA. Summary of Technical Impracticability Waivers at National Priorities List Sites. Report with General Technical Impracticability Site Information Sheets (OSWER Directive 9230.2-24) [R]. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [12] USEPA. Superfund remedy report 16th edition (EPA-542-R-20-001) [R]. Washington, DC, USA: U. S. Environmental Protection Agency, 2020.
- (责任编辑: 靳炜)

## Problems and suggestion for the remediation of volatile organic polluted sites in China

MA Jie\*

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

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

**Abstract** Volatile organic compounds (VOCs) have the characteristics of highly volatilization, easy migration, complex environmental regression mechanism and high heterogeneity of occurrence and distribution, which makes it difficult to repair and control VOCs polluted sites. In the real estate development, contaminated sites that have not been completely repaired are prone to health risks such as steam invasion, and even cause social group incidents, so VOCs contaminated sites repair is the focus of environmental management departments. After more than ten years of development, however, consideration of the particularity of VOCs are still insufficient. Five key problems existing in the remediation and remedy assessment were summarized in this paper. Combined with domestic and foreign engineering practice experience and scientific research results, targeted countermeasures and suggestions were put forward for these five problems, in order to provide reference for the remediation and safe utilization of VOCs polluted sites in China.

**Keywords** contaminated site; soil remediation; groundwater remediation; risk mitigation; remediation verification; site remediation