



文章栏目: 专论

DOI 10.12030/j.cjee.202304072 中图分类号 X53 文献标识码 A

马杰. 关于制定地下水修复目标上限值(风险管制值)的建议[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3474-3477. [MA Jie. Suggestion for setting upper limit values of groundwater remediation target values[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3474-3477.]

# 关于制定地下水修复目标上限值(风险管制值)的建议

马杰<sup>✉</sup>

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

**摘要** 修复目标值是评判场地修复是否合格以及修复后地块能否安全利用的唯一标准, 因此制定合理的修复目标值对于污染场地修复治理和安全利用起着至关重要的作用。大部分污染场地需要同时进行土壤和地下水修复, 生态环境部发布了《建设用土壤污染修复目标值制定指南(试行)》, 然而地下水修复目标值制定的指南标准尚未发布。少数项目制定的地下水修复目标值过于宽松, 无法保障地块的风险可控和安全利用。因此, 建议借鉴土壤环境管理的思路, 制定一个类似于“土壤管制值”的“地下水修复目标上限值(风险管制值)”。该值的制定不能只基于风险评估计算的结果, 而应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、健康和环境风险、国外同类标准的取值、检测方法的准确度和成本、经济社会承受能力等因素, 力争做到合规合法、科学严谨、综合平衡。

**关键词** 污染地块; 场地修复; 地下水修复; 修复目标值; 风险管制值; 修复效果评估; 风险管控; 风险评估

地下水修复是污染场地修复的核心内容, 然而我国场地修复行业长期存在“重土轻水”的问题。污染物在土壤中的赋存分布呈现高度的非均质性, 而地下水是一个动态开放系统, 故地下水监测更容易反映出地层的污染状况, 对于挥发性有机物(VOCs)污染场地来说更为突出<sup>[1]</sup>。因此, 笔者长期呼吁在污染地块管理领域对地下水环境质量的监管应提升到与土壤环境质量相同的地位。上述观点及其科学机制已在本系列专论 1《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》和专论 3《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》中已经进行过详细的讨论<sup>[1-2]</sup>。在近期发表的专论 4《我国挥发性有机污染场地修复中存在的问题及对策建议》中, 笔者总结了我国 VOCs 污染场地修复管控及效果评估方面存在的 5 个问题<sup>[3]</sup>: 1) 污染修复深度止步于土壤层, 忽视了基岩层中的污染; 2) 表层土采样可能会高估 VOCs 污染土壤的修复效果; 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; 4) 地下水修复目标值的制定流程不规范, 部分项目存在修复目标值过于宽松的问题; 5) 少数复杂高风险场地未能彻底修复即进行敏感用地类型开发。本文则基于问题 4 展开关于制定地下水修复目标值的讨论。

## 1 地下水修复目标值设定方面存在的问题及解决问题总思路

污染场地修复效果评估是污染场地环境管理工作的关键环节, 在管理链条中起最终把关作用。修复目标值是评判污染场地修复是否合格, 以及修复后地块能否安全利用的唯一标准, 因此制定合理的修复目标值对于污染场地修复治理和安全利用起着至关重要的作用。目标值设定过严会导致过度修复, 而目标值设定过松则无法保障地块的风险可控和安全利用。

污染场地修复一般同时包括土壤和地下水的修复。2022 年 12 月, 生态环境部发布了《建设用土壤污染修复目标值制定指南(试行)》, 然而地下水修复目标值制定的指南标准长期缺位。目前, 国内常以 GB/T14848 的 III 类或者 IV 类地下水标准作为修复目标, 当难以达到 IV 类地下水标准时一般利用风险评估

收稿日期: 2023-04-18; 录用日期: 2023-10-08

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(2462022QNXZ006)

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

计算一套更加宽松的目标值。然而，少数项目基于风险评估计算出的地下水修复目标值过于宽松，无法保障地块未来的安全利用。特别是对于挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs, 如苯系物、氯代烃等) 污染场地，项目制定的 VOCs 的地下水修复目标值超过了这些化合物的有效溶解度，这意味着地层中存在该化合物的纯相 (即非水相液体, nonaqueous phase liquids, NAPL)，即修复后场地地层中仍存在 NAPL 相污染物亦会被认为修复达标 (合格)，且该地块达到了安全利用标准，这显然是极其不合理的。NAPL 是污染场地最重要的污染源形态，如果污染源没有清除干净，则说明修复治理的效果不佳，应继续进行修复治理。关于地层中是否存在 NAPL，典型错误是认为“高密度的土壤钻孔没有发现 NAPL 则说明地层中不存在 NAPL”。然而，“Absence of evidence is not evidence of absence”，由于 NAPL 赋存分布的高度非均质性，土壤钻孔可能无法勘测到 NAPL (特别是 DNAPL) [2]，但并不代表地层中没有 NAPL。而且跟土壤监测相比，地下水监测更容易指示污染源的存在 [1]。

解决上述问题的关键是借鉴土壤环境管理的思路，制定一个类似于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB36600-2018) 中“土壤管制值”的“地下水修复目标上限值 (风险管制值)”。在任何修复项目中，地下水修复目标值的设定不应超过这个上限值，以避免“一放就乱”。同时参考《建设用地土壤污染修复目标值制定指南 (试行)》中的思路，允许地下水修复目标值根据项目的实际情况进行适度的调整，避免“一收就死”。随着科学研究的进展、修复技术的进步、经济的发展及社会文明程度的提升，修复目标上限值还应做到不断地调整优化，从而实现对于我国地下水环境质量的动态管理和不断提升。

## 2 制定地下水修复目标上限值的思考和建议

目前，在实际项目中，常以 GB/T14848 的 III 类或者 IV 类地下水标准作为修复目标，当难以达到 IV 类地下水标准时则通过风险评估计算一套更加宽松的目标值。然而，少数项目基于风险评估计算得出的地下水修复目标值过于宽松，无法保障地块未来的安全利用。笔者认为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，而应充分考虑每种污染物的理化性质、迁移转化归趋机制、环境赋存特征、健康和环境风险、国外同类标准的取值、检测方法的准确度和成本、经济社会承受能力等因素，力争做到合规合法、科学严谨、综合平衡。以下将从风险评估方法的可靠性、有效溶解度的影响、不同污染物的迁移归趋暴露毒性的差异、现行地下水标准存在的问题、现行标准与国外同类标准的差距等方面展开讨论。

### 2.1 制定修复目标值时不应完全参照风险评估计算结果，因其具有较大的主观性和不确定性

我国已建立起基于风险的污染场地管理制度和技术体系，然而“基于风险”并不意味着“仅仅依赖风险评估计算”。因为风险评估计算存在较大的主观性和不确定性，其结果并不是唯一的、确定的、完全客观公正的。风险评估模型计算结果的误差有多个来源，包括概念模型误差、数学模型误差、输入参数误差等。《污染场地 VOCs 蒸气入侵风险评估与管控》第六章第五节对于挥发吸入室内空气 (蒸气入侵) 暴露途径的风险评估模型误差进行了详细介绍 [4]。本文仅以输入参数误差为例对风险评估计算的不确定性进行介绍。风险评估计算需输入包括环境介质理化性质 (土、水、气)、污染物理化性质、毒性参数、暴露参数等 4 大类共计几十种输入参数。任何一种输入参数的变化都会影响风险计算结果，部分关键参数的微小变化可能导致计算结果几倍甚至数量级的变化 (模型敏感性高)。在实际场地中，很多参数都存在不同程度的时间和空间变异性，在同一场地部分参数的时间-空间波动可能高达几个数量级，然而在风险计算时 (如我国 HJ 25.3 方法或者美国 ASTM 方法) 每种输入参数只取一个数值，因此风险评估计算结果具有较高的不确定性 (模型不确定性高)。另外，风险评估计算的输入参数是人为选择的，甚至部分输入参数选取不同的数值都能找到一定的合理性都能自圆其说，因此风险评估计算具有一定的主观性，很难做到完全精准和绝对客观公正。

### 2.2 有效溶解度决定了污染物在地下水中的浓度上限

水中溶解度是指每升水中所能溶解的溶质的总质量，单位为  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。有效溶解度是指混合物中特定组分在每升水中所能溶解的溶质的总质量。如苯在水中的溶解度是  $1\ 800\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而常规汽油中苯在水中的有效溶解度只有  $20\sim 40\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这是由于苯仅是汽油上千种化学组分中的一种 (质量占比约为汽油的  $1\%\sim 2\%$ )，因此汽油中苯的有效溶解度远低于其纯物质的水中溶解度。有效溶解度构成了污染物地下水浓度的上限，如果地下水中检测到的有机物浓度超过其有效溶解度，则说明地层中存在有机物的纯相 (即 NAPL 相)。

而实际上，由于地下水流动往往很缓慢，只有与 NAPL 源紧邻区域的地下水中污染物质量浓度才能达

到或接近其有效溶解度。当污染物溶解进入地下水后,在对流、弥散、扩散等机制作用下其质量浓度会不断被稀释而降低,另外在地下水采样时污染物在监测井中可能被进一步稀释。因此,即使在地层中存在LNAPL,采样监测得到的污染物质量浓度可能也远低于其有效溶解度。BRUCE等<sup>[5]</sup>认为测得的地下水中苯质量浓度超过其有效溶解度的20%即可认为地层中存在LNAPL。经验值显示,汽油污染地下水中的苯质量浓度超过 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,或者总石油烃浓度超过 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,认为存在LNAPL。也有研究认为,油污染地下水中的苯质量浓度超过 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 即可认为存在LNAPL<sup>[6]</sup>。综合以上研究成果和国外实际经验,笔者认为地下水修复目标值不应超过有效溶解度(注意不是水中溶解度)的20%。

### 2.3 制定修复目标值时需考虑不同类型污染物的迁移、归趋、暴露和毒性等方面的差异

不同类型的污染物(如重金属、VOCs、SVOCs)在迁移转化行为、环境归趋机制、暴露途径及毒性方面的差异巨大。易溶于水的化合物泄漏进入地层后往往迅速溶于地下水,因此会出现土壤中无检出而地下水中浓度较高的现象。对于这类物质,在制定地下水修复目标值时要特别关注。对于再开发场地,重金属和SVOCs都可相对容易地通过风险管控措施切断人体暴露途径,而VOCs由于其易挥发和易迁移的特点,很难通过风险管控完全阻断人体暴露。土壤或者地下水中的VOCs可通过挥发进入室内空气(蒸气入侵)和挥发进入室外空气产生人体暴露。国内已经有若干再开发场地的蒸气入侵实际案例<sup>[2,7]</sup>。因此,对于VOCs的地下水污染及其修复目标值应给与额外的关注。

### 2.4 GB/T 14848 中的与地下水环境管理需求不完全匹配,地下水修复目标值制定应聚焦环境管理需求

原国土资源部和水利部共同制定的《地下水质量标准》(GB/T 14848)是现阶段地下水环境管理工作的主要依据,而生态环境部尚未发布基于环境管理需求的地下水环境质量标准。这给我国地下水以及污染场地环境管理工作带来了一系列问题。目前,大部分场地调查项目通常选择GB/T 14848中的39项常规指标作为监测指标,然而这39项中的大部分指标并非污染因子。其中,与污染场地关系密切的仅包括4项VOCs(三氯甲烷、四氯化碳、苯、甲苯)和6项金属(汞、砷、硒、镉、六价铬、铅),而实际场地的污染物种类远多于这4+6种。另外,部分场地调查项目选择GB36600中的45项基本项目作为地下水监测指标,而GB36600是土壤风险管控标准并未考虑污染物在土壤和地下水中赋存特征的差异。综上所述,笔者建议生态环境管理部门尽快制定满足环境管理需求的地下水监测指标及其标准值。

GB/T 14848用于污染场地和地下水环境管理时存在的其他问题还有:1)部分高毒性和常用污染物的指标偏高,未必能有效管控其环境和健康风险,如氯乙烯、二氯甲烷;2)个别指标不明确,如1,2-二氯乙烯未规定顺式、反式或是总量;3)一些污染场地中的常见指标缺乏,如C6-C9石油烃、C10-C40石油烃、甲基叔丁基醚等;4)一些重点行业的典型特征污染物缺乏,如杂环芳烃、酚类等。

综上所述,笔者建议管理部门应尽快对地下水监测因子进行扩容,在扩容时应综合考虑国内外地下水标准、国内已有的监测方法标准、国内场地调查实践检出频率较高的特征污染物。本文提出了一些具体的补充建议:C6-C9石油烃、C10-C40石油烃、三甲基苯类、异丙苯、甲基叔丁基醚、四乙基铅、1,2-二溴乙烷、烷基萘类、丙酮、甲醛、乙醛、苯酚类、烷基酚类、氯酚类、苯胺类、甲苯胺类、氯苯胺类、硝基苯胺类、硝基苯类、硝基甲苯类、硝基氯苯类、二硫化碳、萘、菲、芘、苈、含氮杂环芳烃类、含硫杂环芳烃类、含氧杂环芳烃类、顺-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、1,2,3-三氯丙烷、1,1-二氯乙烷、四氯乙烷类、六氯丁二烯、六氯乙烷。

### 2.5 地下水环境质量标准的制定应跟上国家整体的发展态势以及其他环保行业的发展步伐

环境质量标准的核心功能在于为环境质量状况提供对比依据,与援引环境质量标准的法律规定、行政规划等要求共同发挥设定目标、考核激励、督政问责的作用<sup>[8]</sup>。近十年来,我国大气污染防治取得了举世瞩目的成就,我国大气污染物排放量大幅下降,主要空气指标显著改善,并赢得了国际社会高度评价。2012年被认为是这一切变化的起点,当年原环境保护部修订了《环境空气质量标准(GB3095-2012)》,从而开启了大气污染防治的“黄金十年”<sup>[9]</sup>。中国现行的环境空气质量标准及大气污染物排放标准中的部分指标已达到甚至比发达国家更加严格,正是严格的环境标准推动中国成为全球空气质量改善速度最快的国家,蓝天保卫战的成就极大地提升了全体国民的获得感和幸福感。在地下水环境标准的宽严程度方面,我国与发达国家的差距仍十分明显,环境监管的提升空间很大。第2个百年目标要求2049我国要建成富强、民主、文明、和谐、美

丽的社会主义现代化强国。展望未来的 26 年, 我国的地下水环境质量管理要跟上国家整体的发展态势及其他环保领域的发展步伐, 以全面推进美丽中国建设。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] BRUCE L, MILLER T, HOCKMAN B. In Solubility versus equilibrium saturation of gasoline compounds: A method to estimate fuel/water partition coefficient using solubility or Koc, NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons in Ground Water, Dublin, OH, USA, 1991; National Water Well Association: Dublin, OH, USA, 1991:571-582.
- [6] PEARGIN T, KOHLHATKAR R. In empirical data supporting groundwater benzene concentration exclusion criteria for petroleum vapor intrusion investigations, battelle presentation at international symposium on bioremediation and sustainable environmental technologies, Reno, NV, USA, 2011.
- [7] 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.
- [8] 尤明青. 论环境质量标准与环境污染侵权责任认定[J]. 中国法学, 2017, 200(6): 283-300.
- [9] 马军, 阮清驾, 代晓娟, 等. 蓝天之路: 十年巨变暨 2030 展望[R]. 北京: 公众环境研究中心(IPE): 2022.

(责任编辑: 靳炜)

## Suggestion for setting upper limit values of groundwater remediation target values

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](mailto:rubpmj@sina.com)

**Abstract** Remediation target values are the only criterion for evaluating whether the site cleaned up and whether the remediated land can be safely utilized. Therefore, developing a reasonable remediation target value plays a crucial role in the remediation and safe redevelopment of contaminated sites. Most of contaminated sites need cleaning up both soil and groundwater. Ministry of Ecology and Environment of China published guidelines for setting soil remediation target values. However, there has been a long-term absence of guidelines for setting groundwater remediation target values. For some site remediation projects, the groundwater remediation target values were too loose to ensure the risk is under control and the remediated land can be safely utilized. Therefore, this article suggests drawing on the ideas of soil environmental management to develop a groundwater remediation target upper limit value similar to the soil risk intervention value. Development of this value should not be solely based on the results of risk assessment calculations, but should fully consider the physical and chemical properties, fate and transport mechanisms, environmental occurrence characteristics, health and environmental risks, values of similar foreign standards, accuracy and cost of detection methods, and economic and social affordability of each pollutant.

**Keywords** contaminated site; site remediation; groundwater remediation; remediation target value; risk intervention values; assessment of remediation effect; risk mitigation; risk assessment