

# 地质工程中的环境地质问题和污染物迁移研究

王宗星<sup>1</sup> 刘昊<sup>1</sup> 向懋笔<sup>1</sup> 茆大伟<sup>1</sup> 闫海虎<sup>2</sup>

1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 长沙湖南 410014

2. 生态环境部华南环境科学研究所 广州广东 510655

**摘要:** 环境污染与地质灾害促使人们关注诸如污染物迁移等问题背后的环境地质问题, 本文通过分析环境地质中污染物迁移的机理、过程、影响因素等, 对地质工程中的环境治理与改善提供分析探索。

**关键词:** 地质工程; 环境地质; 污染物迁移

污染物迁移进入地质环境中, 会发生植物及人体危害风险。PFAS (per- and polyfluoroalkyl substance, 全氟和多氟烷基物) 就是这样的污染迁移物。尤其以 PFOA (perfluorooctanoic Acid, 全氟辛酸) 及其衍生物被检出的频率最高, 达到 66%。本文我们就以 PFOA 为研究对象, 以考察研究地质工程中污染物的迁移变化。

了解污染迁移物 PFOA 的迁移机制, 探究污染迁移物 PFOA 在地质环境介质中的迁移规律并选择合适的监测手段进行分析, 对于评估环境地质影响和削弱或消除潜在风险至关重要。

## 一、污染迁移物的性状研究

全氟和多氟烷基物 (PFAS) 是烷烃分子的氢被氟取代的一类氟取代有机物, 二十世纪四十年代末由美国 3M 公司开发, 广泛应用于工业及消费品等领域。这类物质在环境中极难降解, 进入人体后会长久积聚, 被称为“永驻化学品”。

美国环境保护署通过对近几十年来与公众健康危害的包括污染物迁移等在内的科学跟踪与调查认为, 接触了某些形式的 PFAS 化学物质的公众和肾癌、睾丸癌、甲状腺疾病、高胆固醇等健康问题的高发息息相关。

清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室在中国 66 个城市采集的 526 份饮用水样本中, 监测出了 PFAS “永驻化学品”, 浓度最高的城市是四川省的自贡市, PFAS 浓度最低的城市是新疆维吾尔自治区的阿图什市。需要注意的是, 与其他地区相比, 中国东南沿海一带和中国西南地区的饮用水样本中监测到的 PFAS 的浓度也相对较高。研究团队对采集的数据分析研究后认为, 这些地区的 PFAS 浓度较高, 可能与密集的工业活动尤其与生产含氟聚

合物有关。

## 二、污染迁移物在环境地质中的迁移变化

### 1. 污染迁移物在水体环境介质中的迁移变化

研究影响污染迁移物在水体环境介质中的迁移机制与迁移过程, 是监测评估并借以改善或消除饮用水毒害风险的关键。

#### (1) 静电吸附

污染迁移物 PFOA 的亲水性官能团与水体环境介质之间及相邻污染迁移物离子之间, 静电吸附作用诱使水体环境介质表面带正电的官能团, 依靠静电作用吸引污染迁移物的负离子基, 这会抑制污染迁移物的迁移。水体环境介质表面带负电的官能团靠近时, 静电排斥, 会激发污染迁移物迁移率升高<sup>①</sup>。见示意图一。



示意图一 静电吸附作用机理

#### (2) 疏水作用

基于烷烃分子 C—F 键的疏水特性, 污染迁移物 PFOA 聚集在水体环境介质中形成胶束或半胶束, 以及双层结构。由于疏水基团彼此靠近和聚集, 排斥水体环境中的介质水分子。

污染迁移物 PFOA 的疏水尾部还可以被吸附在疏水性介质的表面形成半胶束结构。当介质表面带正电荷时, 污染迁移物 PFOA 的亲水性基团会由于静电引力而被吸附在表面, 吸附过程中也可形成胶束和半胶束结构<sup>②</sup>。

#### (3) 氢键作用

污染迁移物 PFOA 的 C—F 键具有强烈的疏水性, 很难与介质中某些官能团形成氢键, 但污染迁移物 PFOA 阴离子的头部官能基团可以作为上述基团中氢键的受体。氢键作为控制污染迁移物 PFOA 在环境中吸附和迁移的重要机制之一, 使污染迁移物 PFOA 在介质中受到更大程度的吸附, 导致其在环境中的迁移降低。

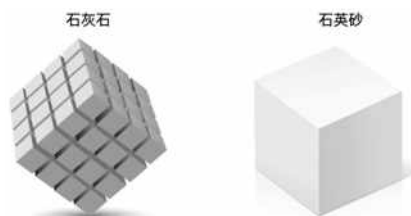
#### (4) 污染迁移物在土壤地质环境中的迁移变化

污染迁移物 PFOA 在土壤地质环境介质中的分布及迁移变化受到 PFOA 在土壤沉积物中的分配、吸附、解吸作用的影响, 导致污染迁移物 PFOA 在土壤环境介质中的残留浓度变化。土壤地质环境中污染迁移物 PFOA 的迁移转化规律决定了其环境效应, 是进行环境和健康风险评估的基础。

#### 2. 污染迁移物在土壤地质环境中的吸附截留作用

土壤吸附是影响污染迁移物 PFOA 迁移的主要因素之一, 并且受到污染迁移物 PFOA 分子结构、理化特性、土壤中的有机质及矿物组成、环境 pH 值、离子强度等性质的影响。污染迁移物 PFOA 进入土壤表层下的包气带后, 一部分被吸附截留在土壤中, 一部分通过化学反应转化或部分降解, 相关理化性质也会发生变化。

石灰石比石英砂具有更大比表面积, 可吸附更多的化合物, 而石英砂与污染迁移物 PFOA 之间存在静电斥力, 导致污染迁移物 PFOA 在石灰石中的截留率高于石英砂。固相吸附相相对于水体环境介质的吸附截留量要小, 在土壤中依然具有显著的迁移能力。天然土壤中有机物和矿物等成分比石英砂和石灰石更复杂, 不同类型土壤中污染迁移物 PFOA 的迁移行为和控制机制会存在差异<sup>③</sup>。见示意图二。



示意图二 石灰石与石英砂比表面积比较

#### 3. 碳链长度与官能基对污染迁移物在土壤地质环境中迁移的影响

污染迁移物 PFOA 分子的碳链长度与官能团的差异, 影响它们在土壤地质环境中的吸附性。吸附量随着碳链长度的增加而增加, 不同的功能性亲水基体积越大, 疏水性越强, 越容易被吸附, 吸附效果也越好。随着碳链长度减少, 疏水

效应减弱, 范德华力相互作用较弱, 而烷基链相邻的基团体积比较小时, 这种空间结构的差异也是导致疏水性较弱, 吸附量减少的主要原因。

#### 4. 电荷、pH 值对污染迁移物在土壤地质环境中迁移的影响

大多数土壤不仅含有恒定电荷胶体, 也含有可变电荷载体, 通过二者的共同作用, 土壤净表面的电荷随着二者比例的不同表现出此消彼长的特性。

表面负电荷积聚排斥 PFOA 带负电荷的核心官能团, 减弱其与带正电荷的土壤颗粒表面之间的静电吸引。当土壤 pH 值下降时, 土壤的净表面负电荷随之减少, 吸附量增加。此外, 离子交换量对土壤吸附 PFOA 的影响也与污染物的特性有关, 短链强离子特性可以使其与土壤中部分阴离子产生离子交换作用, 增加土壤吸附量<sup>④</sup>。

#### 5. 土壤颗粒对污染迁移物在土壤地质环境中迁移的影响

污染迁移物 PFOA 在不同粒径土壤上的吸附能力变化趋势较为相似, 即比表面积和孔径越大, 吸附容量越大。同时, 较大的孔径结构能提供足够的空间来容纳 PFOA 分子聚集。

### 三、污染迁移物在植被中聚积的环境与生态风险

污染迁移物 PFOA 在土壤环境中被植物根系吸收, 随着植物的生长, 逐渐将其输送转移至地上的茎叶部分。污染迁移物 PFOA 在植物根系的蓄积程度取决于污染迁移物 PFOA 本身在土壤环境中的生物可利用性。污染迁移物 PFOA 的疏水性越强, 其生物可利用性就越低。

污染迁移物 PFOA 在农作物中的累积还与其碳链长度有关。碳链相对较长的, 污染迁移物 PFOA 可被土壤直接大量吸附而沉积下来。碳链相对较短的, 污染迁移物 PFOA 会优先通过植物叶片的蒸腾作用沿着植物根茎内部的韧皮通道向上运输。

#### 1. 污染迁移物的植被损害

随着污染迁移物 PFOA 在作物体内不断积聚, 地上植物茎叶片的氨基酸代谢途径会受到污染迁移物 PFOA 的干扰, 诱发细胞抗氧化防御系统受到损伤和破坏, 持续过量时便会产生毒害作用。长期暴露可能会对植被环境地质构成更高的生态风险。

#### 2. 污染迁移物对人体健康损害

污染迁移物 PFOA 累积会对人体器官、系统等产生极大的毒性效应。世界各国大量研究均表明污染迁移物 PFOA

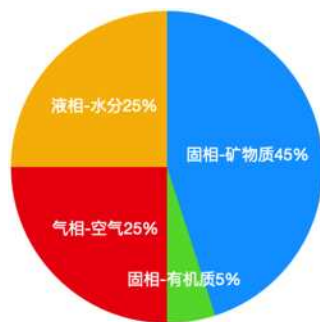
已成为包括癌症在内的很多疾病的潜在诱因。污染迁移物 PFOA 导致肾功能降低, 引起与肾脏相关的代谢失调。同时, 污染迁移物 PFOA 对机体的免疫系统产生毒害作用, 导致溃疡性结肠炎、儿童哮喘等相关疾病。此外, 如果食用被污染迁移物 PFOA 污染的牲畜家禽类产品, 也造成人体暴露。

#### 四、环境地质问题和污染物迁移的研究展望

基于土壤环境地质中污染迁移物的性状研究、迁移变化研究、植被中聚积的环境与生态风险研究, 环境地质与生命体的安全威胁仍然严峻, 不同种类的污染迁移物 PFOA 在土壤介质中的环境行为的差异性, 包括吸附机理、土壤环境等多种因素的影响仍在被更多关注和进一步探索。

##### 1. 污染迁移物 PFOA 在三相综合系统下的迁移研究

土壤作为固相-液相-气相三相合一的综合系统, 仍需要加大研究探索的力度, 深入开展模拟实际场景的污染迁移物 PFOA 迁移转化规律研究。见示意图三。



示意图三 土壤三相图

##### 2. 污染迁移物 PFOA 在三相综合系统下的复合性迁移研究

污染迁移物 PFOA 在实际土壤环境中通常仍伴随其他的污染形式, 比如重金属危险化学品等, 当污染迁移物 PFOA 以复合污染的形式存在时, 仍需要深入研究不同种类污染在土壤环境中的交互效应, 其作用机制需要探究, 以明确环境地质中共存的污染物的潜在风险, 为污染迁移物 PFOA 的生态风险评估提供更详细的决策工具⑤。

#### 五、环境地质问题和污染物迁移的生态恢复展望

通过环境地质中污染物迁移研究以及环境污染特征的研究, 为地质环境的污染防治和修复提供根本遵循, 是制订污染修复方案的基础。

##### 1. 环境地质中污染物迁移的修复方法

通过水动力场控制污染物运移, 减少扩散程度, 属于物理法。投放可与污染物进行氧化或还原的化学药剂, 分解污

染物达到降解目的, 属于化学法。利用天然的或可培养的微生物群, 通过自身代谢将污染物降解成无毒或低毒物质的, 属于生物法。通过天然过程来分解和改变污染物的, 属于自然衰减法。通过进一步认识污染物迁移的规律, 适配一种或几种方法是未来尝试与破解的基础。

##### 2. 环境地质中污染物迁移的修复技术

原位修复将可降解污染物的修复剂置于地下, 成本低, 可修复范围大, 且不受污染物埋藏深度的限制, 缺点是修复剂与岩土和地下水发生化学作用影响修复效果。异位技术利用地下水井和包气带井, 抽出地下水或抽出污染气体至地面后, 再进行修复, 尤其适用于污染物浓度高、范围大、埋藏深的场地, 前期修复效率高, 处理量大, 后期易出现污染物拖尾和反弹。

#### 六. 结论

1. 环境地质以人地关系为核心, 促进人地协调发展。本文借助环境地质污染迁移物 PFOA 的迁移机理研究, 为解决 PFAS 全球污染物迁移公害提供视角, 并对未来深入的复合性研究及环境修复提供思路。

2. 在污染物迁移研究中发现, 吸附、静电、氢键、电荷、pH 值、土壤粒径、分子链长短等因素都会对污染物迁移形成显性差异, 隐性差异仍需要进一步考察多相模型以及多生态共生模型。

3. 明确污染迁移物发生发展的规律, 适配一种或几种环境地质修复方法是未来环境地质灾害破解的基础。

#### 参考文献

- [1] 刘世洋, 等. PFASs 在地下水中的界面吸附行为研究进展 [J]. 环境化学, 2023, 42(6): 1771-1783.
- [2] 李辉, 等. PFOA 和 PFOS 在介质中迁移行为和数值模拟研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2589-2602.
- [3] Sheau-Yun Dora Chiang, etc. Supercritical water oxidation for the destruction of spent media wastes generated from PFAS treatment[J]. Journal of Hazardous Materials Volume 460, 15 October 2023, 132264.
- [4] Michael Cuffney, etc. Factors associated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) serum concentrations in residents of New Hanover County, North Carolina: The GenX exposure study[J]. Environmental Research Volume 237, Part 2, 15 November 2023, 117020.